

**Szegedi Tudományegyetem
Természettudományi és Informatikai Kar
Természeti Földrajzi és Geoinformatikai Tanszék**

Dr. Kovács Ferenc
egyetemi adjunktus

Klímaváltozás földrajzi hatásának értékelése multispektrális vegetáció monitoring módszerekkel

Habilitációs dolgozat

**Szeged
2017**

1. Bevezetés

A klímaváltozási hatások, területhasználati változások a tér- és időbelisége is (Kovács 2011, 2012) közrejátszik abban, hogy az észlelő, értékelő környezeti monitoring rendszerek minden szempontból nagyobb felbontásra törekednek (pl. Copernicus). A folyamatosan adatokat gyűjtő monitoring a távérzékelési rendszereknek köszönhetően az 1970-es évektől akár napi időfelbontással működhet; AVHRR, MODIS, LANDSAT, SPOT szenzorokra alapozhatunk, ha az aktualitás és a több évtizedes folyamatok is érdekesek a számunkra.

Az érvényes Párizsi Egyezmény szerint a globális hőmérséklet emelkedésénél a 2013-ban várthoz képest további +0,3 °C-al számolhatunk, így jó eséllyel +2 °C-nál nagyobb változás várható 2100-ig (Szépszó és Lakatos 2017). Az éghajlatváltozás által generált folyamatok a magasabb komplexitású tájban rendszerszemléletű vizsgálatokat követelnek. A biodiverzitás – a fajok száma szerint – a Föld 58%-án a biztonságos szint alá került, több élőhelyen közbelépés kell a működéshez (Newbold et al. 2016). Az aridifikáció a hazai tájakon is gyakran irreverzibilis hatásokat kelt, amin már az extrém vízmennyiség sem segít (Rakonczi 2011). A vegetáció klímaindikátor szerepe kiemelhető, változása visszahat az éghajlatra, szélsőségek, trendek jelzője, így célszerű, ha róla naprakész információkat gyűjtünk; nem véletlen hogy 30 m-es felbontású felszínborítás-változás adatállomány is készül (Giri et al. 2013).

Az elmúlt évtized kutatásait-oktatásait átfogó összefoglaló célja, hogy képet kapjunk a klímaváltozás mértékéről és annak az egyik fő tájalkotó tényezőt, a vegetációt, azon belül is az erdőket érintő következményeiről. A leírt, Kárpát-medencében regisztrált változások nem átmeneti jelenségek. Az erdei ökoszisztémák szerint hazánk a klímaváltozás által fokozottan veszélyeztetett régió (Mátyás et al. 2010). Az érzékenységet növeli, hogy száz évnél is hosszabb termesztési ciklusra kell stratégia (Móricz et al. 2011). A földhasználatban 1-1,5 millió ha művelt terület változását vetítik előre, ami 7%-os erdőterület-növekedést tenne lehetővé országosan (Gálos et al. 2013). Nem tudjuk, hogy egy jelentős erdőtelepítés hogyan befolyásolja a mezoklimát, pedig a tervezés ilyen kérdéseket tesz fel (Csorba 2013). Erdeink területe, élőfa készlete folyamatosan gyarapszik, évente több mint 3.000.000 t CO₂-t vonnak ki a légkörből. A 26%-os erdősültség elérése érdekében 35 év alatt 600-750.000 ha erdősítés várható, miközben a klímaváltozás szélsőséges próbatételek elé állítja az erdőket (Nemzeti Vidékstratégia 2012-2020). Döntéshozás-támogatásként meghatározható, hogy az erdőgazdálkodás a közeljövőben miként alkalmazkodjon a mezo- és mikroklimatikus adottságokhoz.

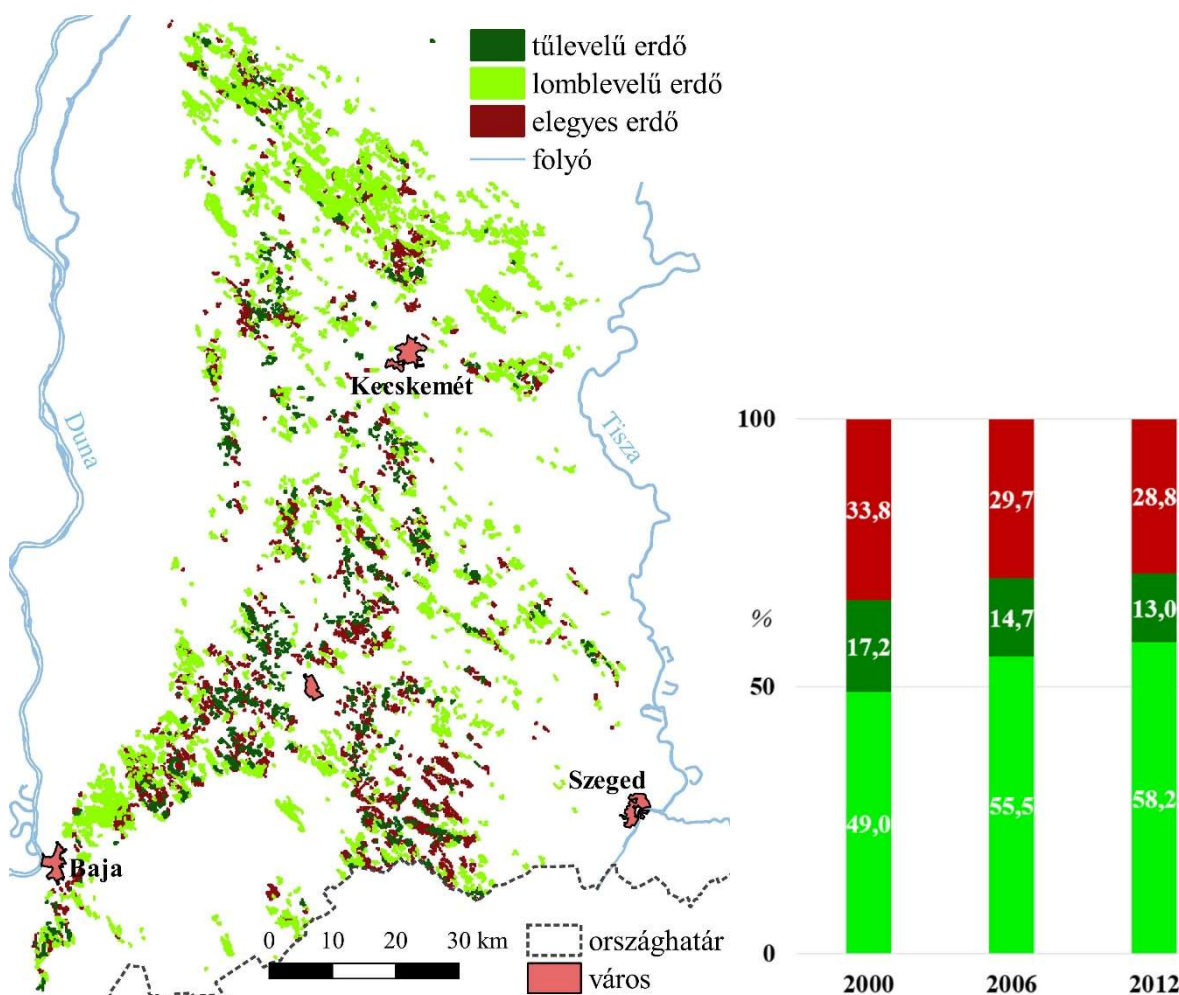
A trendszerű folyamatok mellett a számítások az éghajlati szélsőségek növekedését vetítik előre, ezért a jelenlegi melegedés folyamatát, az aszályok kialakulását és hatását megfelelő méretarányban kell monitorozni. A fásszárú növényzet jó indikátora a problémakörnek, ezért célunk az erdők regionális/lokális megfigyelése. Általában a síkvidéken a mezőgazdaság, a településhálózat miatt az erdők ritkábbak, ezért a klímaváltozás hatása nehezebben felismerhető, igaz a Duna-Tisza köze jó mintaterület a fásszárúak magas aránya és az intenzív erdősítés miatt. A gyakorlatban kell csökkenteni a hatások mértékét, ezért távérzékelési módszerekkel számszerűsítve vizsgáltuk, hogy a klímaváltozás különböző időléptékekben felismerhető-e a fásszárú vegetáción. A szélsőséges vízháztartási helyzetek mekkora eltéréseket eredményeznek a közepes léptékű produktivitásban? A stabilitást tekintve az egyensúlyi szint esetleges változása mérvadó, mert annak kimutatása a tájdegradáció szintjének növekedését is mutatja. Mennyire ellenálló a vegetáció az irreverzibilis hatással szemben? A klímaváltozás mértékének ismeretében mérhető reakciók – érzékenység – vizsgálatával megadható az adaptációs képesség, hogy a tényező mennyire képes kivédeni a káros hatásokat. A klímaváltozással szembeni veszélyeztetettségénél az élőhelytípus (erdő) feltételeinek helyben való fennmaradási esélyét is jellemezzük. A műholdas mérések adatait a pontszerű terepi mérések, valamint az ezekre alapozott tapasztalati mutatók adataival „kalibráljuk”, így nagy területekre, jobb terepi felbontással, szinte naprakész információkat adhatunk a gyakorlat számára. Jó eredményekkel szolgálhat az automatikus változás-érzékelés létrehozásához.

2. A mintaterület lehatárolása és a vizsgálat tárgya

A Duna-Tisza közti változások földrajzi értékelését az erdőterületek 2000–2016 nyári félévi monitoring vizsgálatával dolgoztuk fel; a 81–288. napok közötti időt értékeltük. Az általunk felhasznált, 250 m-es térbeli felbontású műholdkép (MODIS) által adott raszterhálón a CLC (Corine Land Cover) térképek (2000, 2006, 2012) alapján határoltuk le az erdőket.

Az erdővel legalább 2/3 részben fedett pixeleket figyeltük meg ott, ahol minimum 3 pixel határol le egy foltot (Kovács 2007). Erdős celláink a CLC időpontok szerint a tényleges erdők 71-85%-át jelentik (a 100%-ban homogén erdős celláknál ez 36%). Jó az átfedés az egyes erdőnél 2000-ben (95%), rossz a fenyőnél 2006-ban (64,5%). 2000–2012 között az erdőterület alapvetően nőtt (2006-ig 17%-al), míg az erdők 49%-a mutat állandó fedettséget (1. ábra).

Homogén cellákkal az évszakos, a fokozatos évközi és a hirtelen változások megkülönböztethetők (Verbesselt et al. 2010). A nagyobb területeket érintő, természeti zavarás – szárazodás – megfigyelésére a kis felbontás alkalmas, de a néhány nap alatt végbemenő humán eredetű változás – fakivágás – kisebb léptékű ennél (Xin et al. 2013). Lunetta et al. (2006) 20%-os átfedésnél mezőgazdaságinak minősítette a 250 m-es cellákat, de Ji és Peters (2003) 1 km-es adatoknál (AVHRR) is elegendőnek találta a 20%-os fedettséget gyeperő területekre. Xin et al. (2013) MODIS termékeknél 60%-os fedettséggel számol erdők esetében.

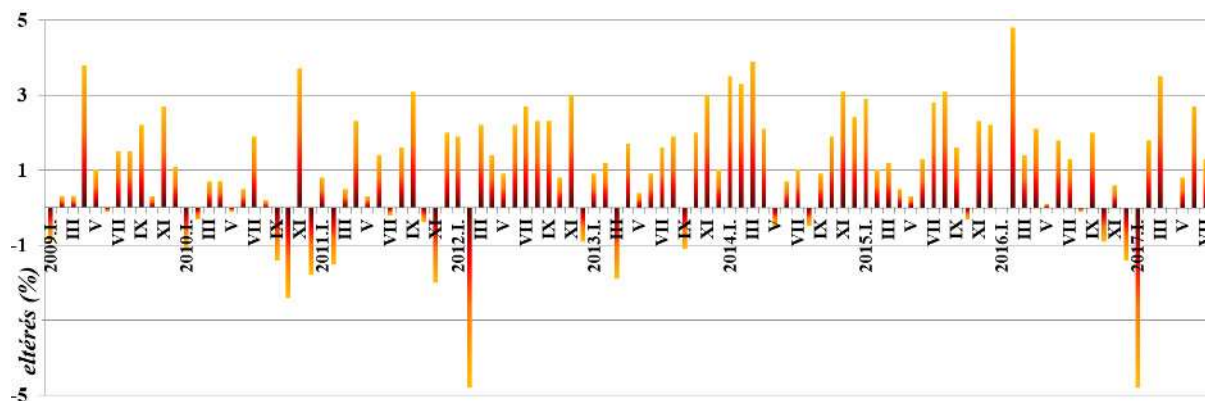


1. ábra A CLC 2012 alapján vizsgálatba vont erdőterületek és a 2/3 részben fedett erdős cellák területi megoszlása a CLC térképezési időpontokban a mintaterületen

2.1. Környezeti probléma és a mintaterület: hőmérséklet, aszály és a klímaváltozás

A klímaváltozás hatásait a hőmérséklet és az aszály változásait feltárva értékeltük. A felmelegedés egy éven belül is kimutatható változás lehet. 2015-16 egymás utáni hónapjainak melegrekordjai során 2016. július lett 137 év legforróbb földi hónapja (GISTEMP 2017). Ha-

zánkban 1901–2016 között +1,1 °C a változás, ami intenzívebb a középső és dél-alföldi tájakon (2. ábra). A Duna-Tisza közén az utóbbi 30 évben +1,2–1,5 °C és 20-30-al több nyári nap jellemző. Az éves, a tavaszi, nyári, őszi változások szignifikánsak; Alföldön nyáron 2,2 °C növekedés is volt az utóbbi 30 évben (Lakatos et al. 2014, Szépszó és Lakatos 2017). A Kárpát-medence szárazodását igazoló modellekben 1961–1990-hez képest 2050-ig 1,2–1,5 °C-al nő az évszakos minimum, maximum. A Duna-Tisza köze nyáron 1,4–3,7 °C-al, a vegetációs időszakot jelző $T_{közép} > 5$ °C 24 nappal nőhet (Bartholy et al. 2011, Mezősi et al. 2016)!

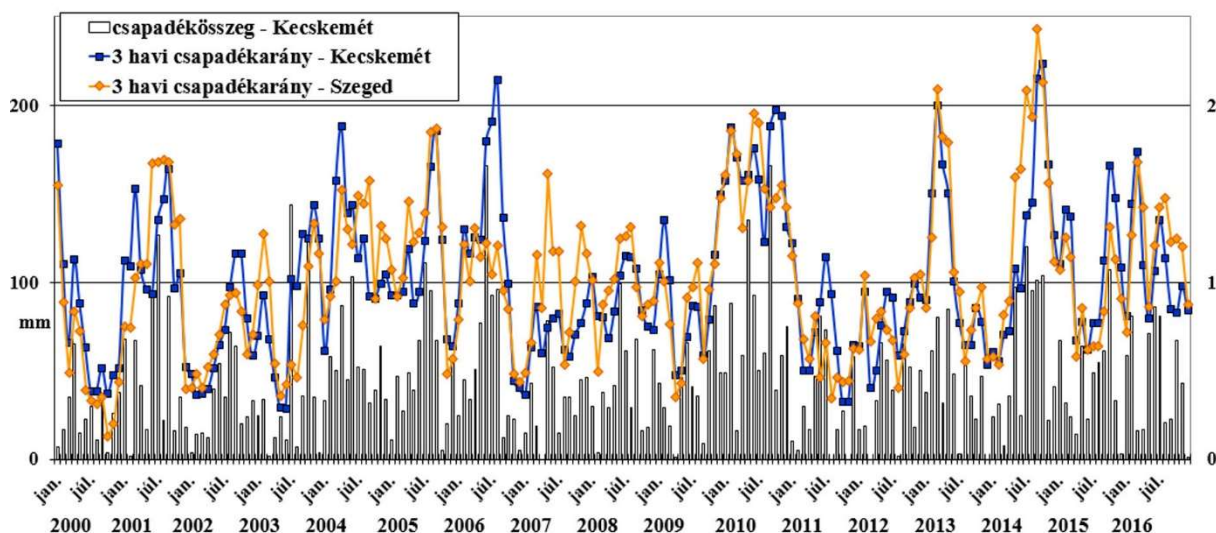


2. ábra Az országos havi hőmérsékleti átlagok eltérése (%) az 1971–2000 normálértéktől (2009. január – 2017. július) (adat: Integrált Vízháztartási Tájékoztató)

A hazai éves csapadékösszeg 1901-től 7%-al csökkent (ebből a tavaszi -17% szignifikáns), de az utóbbi évtizedekre a (nem szignifikáns) növekedés jellemző (3. ábra); fontos a négy csapadékos év; 1998, 1999, 2005, 2010. Az 1963–2012 között sincs kimutatható tendencia, a Duna-Tisza köze a -5 – +5 mm-es osztályban van. Az éghajlati vízhiány átlaga a Duna-Tisza közén 350 mm feletti (Pálfai 2010); 1976–1997 között nem volt 600 mm-nél több éves csapadék. Főleg nyáron nőtt az intenzív csapadék aránya, de csökkentek a kiugró csapadékos évek. Többször jelenhet meg csapadékbomba (microburst). 2000, 2003, 2011 is bekerült a 7 legszárazabb év közé. Körülbelül 5 nappal hosszabbak a száraz időszakok; ősszel ez 4 nappal nőtt, míg a tavasziak egyre tartósabbak (Szépszó és Lakatos 2017). A XX. században 5 évben tért el a csapadék legalább 200 mm-rel az előző évitől, de 2000 óta már 4 ilyen volt (Kovács et al. 2017). A mérések alapján 2010. a legcsapadékosabb, 2011. a legszárazabb évünk! Rakonczai et al. (2012) szerint belvíz és szárazodás egyidőben is előfordulhat.

A XXI. sz-i nyári (+20%) és téli (-20 %) félévekre jellemző csapadék változás melletti hőmérséklet-emelkedés fokozottabb vízigénnyel jár (Blanka et al. 2014). Század végére várható gyakori, tartós aszályok a Dunától keletre (Mezősi et al. 2016). Az „átlag feletti hőmérséklet, átlag alatti csapadék” (H+CS-) együttes előfordulásának átlaga eleve 30% a Duna-Tisza közén, ez 2000–2016-ban már 38-40%; eltérések főleg tavaszra jellemzők (május: 16 alkalomból 10-szer), másodsorban ősszel, nyáron. A 2000–2003 és 2006.09–2009.09. közötti eltérés több, mint 60%. A hőmérséklet pozitív eltérése ennél határozottabb.

A sérülékenységhöz fűződő aszálykárok a természeti feltételek romlását mutatják (Farkas et al. 2015, Kovács et al. 2017). 1995–2016 közötti időben 8 év tekinthető aszálymentesnek, míg a maradék 14 évben az aszály területi aránya 7-szer 70% fölötti volt. A 2000. év óta mért aszályhatás kiemelhető a Duna-Tisza közén (Kovács és Gulácsi 2016). Az 1961–1987-es időszak 4,4–5,5 Pálfai Drought Index (PaDI) átlaga 1988–2012 között 5,6–6,6-ra nőtt (Blanka et al. 2014, Fiala et al. 2014). 2050-re az alföldi aszályérték egy kategóriával nőhet (Csorba et al. 2012). A Duna-Tisza közén a 15-ös skálán 9-es érzékenység és 10 nagyon aszályos év várható, és a század végére a 3 hónapos SPI (Standard Precipitation Index) növekvő aszályveszélyt jósol (Blanka et al. 2014).



3. ábra A Duna-Tisza közére vonatkozó csapadéértékek, illetve az 1901–2016 közötti átlaghoz mért 3 havi csapadékarány (2000–2016) (adatok: Ogimet, OMSZ) (csapadékarány: adott hónap és az előző két hónap csapadékát viszonyítjuk 2000-2016 hónapjainak értékeihez)

2.2. Környezeti probléma és a mintaterület: klímaváltozás és táji következményei

A Duna-Tisza köze homokhátsági vízhiány területileg differenciált, társadalmi hatások erősíthetik, a biológiai produktivitás csökkenhet (Kovács 2007, 2012; Mezösi et al. 2016).

A lefolyás az 1956–2008-as időszak első felében átlag 22 mm, a másodikban 11 mm/év volt (Pálfai 2010). A jellemző talajvíz-kiürülési folyamat csapadékhiányra is visszavezethető, magas térszíneken szembevető, de csak ez nem okozza ekkora süllyedést (Rakonczai és Fehér 2015). 1956–1975 kiegyenlített talajvízjárása, majd a '90-es évek közepéig tartó süllyedés után a vízszint-ingadozás kb. 2 m-el mélyebbre került (Pálfai 2010). 1960–2011-ben átlagnál alacsonyabb talajvízű volt 24 db év (1983–1995, 2000–2003, 2007–2009). A Duna-Tisza közére leírt 5 km³ vízhiány (Rakonczai 2011), a folyóktól messzebb a '60-as évektől már 9 km³; 1500 km²-en a változás visszafordíthatatlan. Egy száraz, egy nedves év 2 km³-nyi készletváltozást okozhat, de egy-két csapadékos év középtáji léptékben csak részleges visszapótlódást tesz lehetővé (Szalai 2012, Rakonczai és Fehér 2015).

A 2011. év aszályra utaló értékei a 2012-nél kisebbek (Kovács és Gulácsi 2016), mert a talaj 2010-ben vizet raktározott. A Duna-Tisza közti szárazságot erősíti a homok felmelegedése, kisugárzása. Az erdők alatti talajok 2/3-a futóhomok, 98%-a gyengén víztartó!

A vizes élőhelyeken 130 éves adatsor szerint a tavak, mocsarak csapadék hatására részben, kis időre élednek újra; az ilyen területek akár ¼-e is szárazodik (Kovács 2009, 2013).

A klímaváltozás valamennyi tájformáló tényezőnek és a belőlük épülő tájnak a hanyatlását okozza, így a tájdegradáció egyben a szintézis csökkenése (Kertész 2009). Farkas et al. (2015) szerint a vegetáció változása az indikátor ami a klíma alakulását összekapcsolja a tájjal. A monitoring eszköz a változási küszöbérték meghatározásához. A Duna-Tisza köze régió nagyjából azonos hatást mutat a klímaváltozási indikátorokkal szemben (Csorba et al. 2012). A szélsőséges vízgazdálkodású talajok, a talajvízszint csökkenést, illetve az aszálynál biomassza produkció csökkenést jelző területek, a szélerózió-veszélyes terek metszete megadja a táj érzékenységet (Mezösi et al. 2014), de szerepet kaphat az interpolált SPI is (Zsákovics et al. 2009). A víz funkció változása (csapadékhiány) gyorsabb a táji rendszerben, a talajvizen keresztül gyakorol trendszerű változásokat (Rakonczai 2011). Az aridifikáció lokálisan, vagy táji léptékben okoz ökológiai átalakulást. A klímahatás fokozata, amikor a talajvíz-csökkenés mellett a biomassza-terméskorrelál a csapadékkal (Rakonczai et al. 2012).

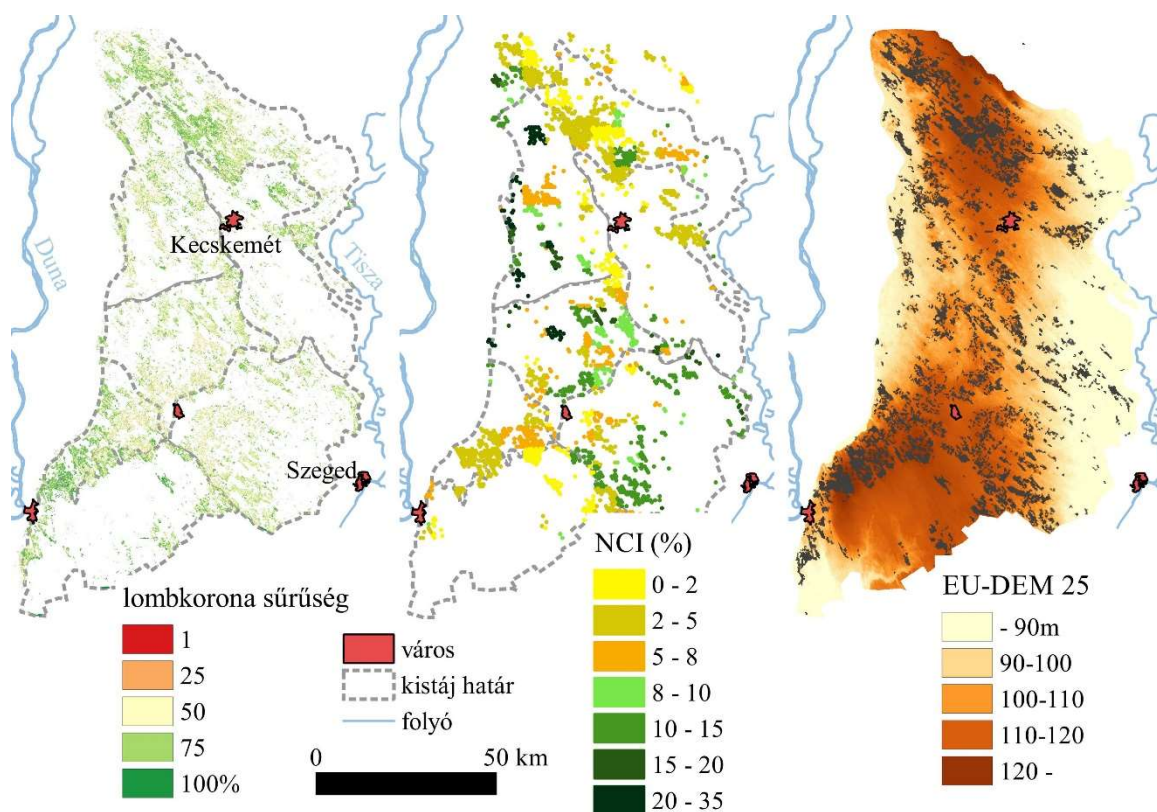
2.3. Környezeti probléma és a mintaterület: klímaváltozás és az erdő

A fenológia választ ad a rövid és hosszú távú klímavariációkra. A szárazsági határ eltolódással pusztulás látható a határon, amiben az utóbbi 30 év aszályossága döntő. Optimális termőhelyi adottságú helyek kerülnek klimatikus határhelyzetbe (Czúcz et al. 2010, Mátyás et al. 2010). A faállomány-növedék 80%-a a 05–07. havi intenzív vízfelhasználással realizálódhat. Hiányt okoz a szignifikáns tavaszi csapadékcsökkenés, és az utóbbi évtizedekben jellemző, egymást követő 4-5 száraz nyár. Az alföldi erdők regenerációs képessége kicsi. Az ültetvények gyors növekedése, szegényes fajösszetétele hátrányokkal jár (Móricz et al. 2011). A mintaterületen az erdőspuszta rét, gyertyános-, kocsányos-, és homoki tölgyes veszélyeztetett. Deák (2011) szerint a fehér nyár, a kocsányos tölgy aránya növelhető.

100 év alatt 3-8 nappal korábbi hazai favirágzás is jellemző (Walkovszky 1998). Erdeink 20%-át adó fehér akác virágzása a '90-es évekre már csak május végéig tartott (Hunkár et al. 2013). 1952–2000 alapján 1,9-4,4 nap/dekád-al változott az akác virágzási ideje is; ezt 1984–1997 mérései megerősítik (Varga et al. 2012, Szabó. et al. 2016). Műholdképek adataival megerősíthető az utóbbi évtized korábbi, intenzívebb kizöldülése. Új erdőkkel nagy területen csökkennének a meleg és száraz napok (Gálos et al. 2013).

A homokterületek fásítása az 1040/1954. határozatnak köszönhető (1. táblázat), majd 2005-től is Bács-Kiskun megyében a legnagyobb a hazai erdősítés (KSH 2017). A Kiskunhalasi-, Kecskeméti-, Kiskőrösi járásokban van az erdők fele, főleg faanyagtermelő (76%), talaj- (12%) és természetvédelmi (7%) funkciókkal (NéBIH EI 2016). Az erdők 4/5-e tájidegen a Duna-Tisza közén (KSH 2017). A táji, természeti tőke index (NCI, Czúcz et al. 2008) a túlelű erdőknél átlagosan 7,7% (max. 32), a lomblevelűeknél 5,8% (max. 28), elegyes erdőknél 7,1% (max. 32). Az erdők ¾-e minimum 50%-ban záródott lombkoronájú (4. ábra).

Az erdők főleg lokálisan hatnak a talajvízszintre; Szilágyi et al. (2012) szerint ez jelentős, de Göbölös (2002) más véleményen van. Pálfi (2010) alapján a helyzetért az erdőterület növekedés a területhasználat változással együtt 10%-ban felelős. Szilágyi és Vörösmarty (1993), valamint Völgyesi (2006) szerint csak az erdőterület növekedés felelőssége 13-15%.



4. ábra A Duna-Tisza köze erdőterületei (HrL, Czúcz et al. 2008, EU-DEM 25 alapján)

1. táblázat Az erdőterület aránya a Duna-Tisza közén (CLC adatok, Göbölös 2002 alapján)

év	X.sz.	XVIII.sz.	1850	1895-1900	1935	1956	1990	2000	2006	2012
erdő (%)	35	4,5	5	7,2	6,6	8,3	15,4	18,2	19,9	21,2

A Duna-Tisza közén a klímahatás erőssége, a magassági viszonyok és az esővíz gyors beszivárgása miatt direkter a biomassza–csapadék kapcsolat. Az erdők területileg differenciáltan érzik a klímaváltozást (Móricz et al. 2011), ami érzékelhető, de kevés a hosszabb időt, megfelelő részletességgel végző kutatás (Kovács 2007). Meghatározó a III–V. havi csapadék, igaz az erdő aszályossági index az V–VII–VIII. hónapokkal számol (Führer et al. 2011). A vegetáció érzékenyebb, ha főként a csapadékból jut vízhez, de az idősorban megjelenő egy-egy nedves év (pl. 2010) a biomassza-produkcióban jellemzően nem kiugró (Kovács 2012, Kovács et al. 2017). Az erdeifenyő idős tűlevelek idő előtt hullanak (Móricz et al. 2011), míg az évgyűrű szélesség a PAI-val 64–87,5%-os együtt futást mutat (Rakonczai et al. 2012).

3. Alkalmazott módszertan

3.1. Multispektrális alapadatok és termékek

A klímaváltozás következményeit nagy területen vizsgáló és értékelő földrajzi megfigyelésünkben az adott tájalkotó tényező monitoringjára van szükség; ebben a megfelelő idő- és térbeli részletességű, objektív, teljes adatbázis felépítése, vagyis a távérzékelés alkalmazása pótolhatatlan. A globális, 1 km-es GLCC felszínfedettség térkép (1992), és a 3 féle erdő osztállyal bíró Pan-European LC Database (1996) adata még AVHRR érzékelővel készült, míg a GLC2000 már SPOT Vegetation szenzor szerinti. A 2001-es globális térkép már MODIS felvételekből áll, amely adott felszínfedettségre részletesen is elemezhető.

A regionális vegetációs monitoring elemzések fő adata ma a MODIS (2. táblázat), melynek felbontása változó a 0,4–14,38 μm -es hullámhossz-tartományban; a Red (vörös) és egy NIR (közel infravörös) 250 m, a 3-7 sávot jelentő Blue (kék), Green (zöld), NIR és SWIR (rövid hullámhosszú infravörös) tartományokban 500 m. A szűk tartományú NIR akadályozza a víz elnyelését, ami a vízgőztartalom zéró hatását eredményezi (Huete et al. 2002). Emberi hatást a felszínborításon főleg a 250 m-es léptékben értékelhetjük (Verbesselt et al. 2010), de a pixelméret közeli objektum vizsgálata önmagában hibaforrás (Giri et al. 2013). A MODIS-al változást mérő rendszerek foltmérete 15-50 ha (Xin et al. 2013), az 1,5 ha-nál kisebb változás már nem látszódik (Lunetta et al. 2006). Rossz korreláció miatt nem használható közvetlenül a MODIS nagy időfelbontása a nagy térbeli felbontással. Ha tudjuk melyik MODIS cella korrelál és az adott nagyfelbontású cellákra átlagot számolunk, akkor pontosabb a regresszió (Kristóf et al. 2007). A Terra és Aqua adatok kvázi 8 napos felbontást eredményeznek, és bár a fenológiai folyamatok megkívánnák az együttes használatot, általában adott vizsgálathoz csak az egyiket használják (Ahl et al. 2006, Solano et al. 2010). Az egymást követő napokon érzékelt reflektancia korrelációja a Terra esetében jobb (0,48). A két szenzor korrelációs együtthatója adott napra csak 0,605 (Kristóf et al. 2007).

A tanulmányban használt MODIS kompozit, mint előfeldolgozott felvétel biztosítja az adatbázisunk minőségét. A PSF (point spread function) szerint a reflektancia 75%-a a pixel környezetéből jöhet (Huang et al. 2002, Tan et al. 2006), ami a vizsgálatban pontatlanságot okozna. A különböző időpontú megfigyeléseknél a pixelméret, a kamera betekintési szöge és a lefedett terület napról napra változó, így a változékonyság a változó területi fedettségéből fakadhat, nem tényleges változásból (Xin et al. 2013). A MODIS pixelre a cellán belüli foltminőség, a homogén felszín arányos területe, az átlagreflektancia alapján számítható reflektancia (Kristóf et al. 2007). Az MVC (Maximum Value Composit) a cellához az NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) maximum által prezentált pálya reflektanciáját párosítja; a 16 napos periódus NDVI_{max} értéke mindig a geometriailag pontosabb kisebb látószögű lesz. Off-nadír cellánál torzul a pixel, nő a VI (vegetációs index) érték, így romlik az évszakos pro-

filminőség, a tenyésztidőszak leírhatósága (Solano et al. 2010). A termékeket átmintázzák a „nominális” pixelméretű GRID-be (Huete et al. 2002).

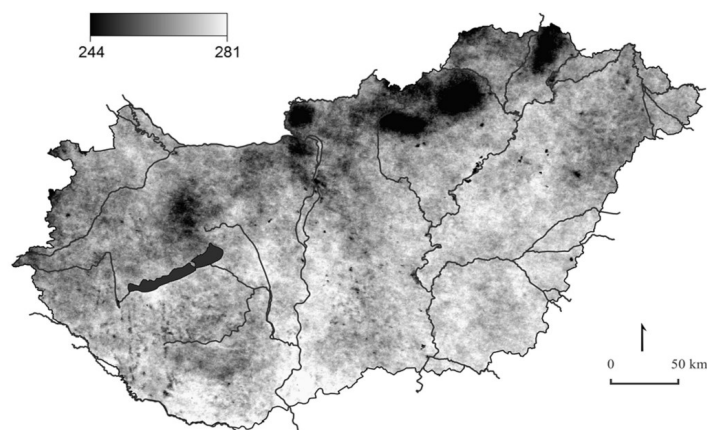
2. táblázat Passzív távérzékelési rendszerek (Xie et al. 2008, Digitalglobe, Airbus alapján)

	Rendszer	Felvétel szélessége	Sáv-szám	Térbeli felbontás	Megfigyelés ideje	Időfelbontás	Ingyenes Igen/Nem
Kis- és durvább felbontás (–30 m)	NOAA AVHRR	3000 km	5 db	1100 m	1978–	1 nap	I
	EOS MODIS	2330	36	250-1000	1999–	1-2	
	LANDSAT TM OLI	185	7 10	30-120 30-100	1984–2011 2013–	16	
Közepes felbontás (2–30 m)	LANDSAT OLI	185	1	15	2013–	16	N
	SENTINEL-2	290	12	10-20	2015–	5	
	SPOT HRG/HRV	60	4	10-20	1986–2015	2-26	
	SPOT-5	60	2	2,5-5	2002–2015	2-26	
	SPOT-6, -7	60	4	6	2012–	<1	
Nagy felbontás (0,5–2 m)	SPOT-6, -7	60	1	1,5	2012–	<1	igény szerint, 1-5
	GeoEye-1	15,2	4	1,65	2008–		
	WorldView-3	13,1	8	3,7	2014–		
Nagyon nagy felbontás (<0,5 m)	GeoEye-1	15,2	1	0,41	2008–		
	WorldView-3	13,1	1+8	0,31-1,24	2014–		

A pályák átfedéseivel 16 nap alatt 64 megfigyelés lehetséges; de minőségi vizsgálattal 5-10 kép várható. A felhős fedéshez az algoritmus más sávokat használ és a hiányzó értéknél interpolál (Verbesselt et al. 2010). A kompozitképeknél alkalmazott BRDF korrekció (bidirectional reflectance distribution function) minimum 5 tiszta pixel értékével működhet, így az adatsor hiányos lehet (van Leeuwen et al. 2006). A pixel alapú interpoláció kockáztatja a nadír érték pontosságát. Ha kell két magas értékből választják ki a nadírközelit (CV-MVC). A kompozit pixelek 87%-a a $\pm 30^\circ$ -os látószögű tartományban van; a nagy szögek csökkentek. Kisebbs felbontással (pl. 500 m), hosszabb időtartammal (32 nap) nő a megbízhatóság (Tan et al. 2006). Az alkalmazott MODIS ver.5. csökkentett a GRID hibáin, napi reflektancia alapú, 1200*1200 km²-es, szinuszosidális egységekben érhető el (Solano et al. 2010). Vizsgálatunkban a MOD13Q1, 16 napos, 250 m-es felbontású kompozittermékét használtuk. A képfeldolgozással a kompozit áll közelebb a napi terepi adatokhoz (Hmimina et al. 2013).

A képeken pixel alapon használtuk a minőségi adatokat (QA). A „pixel reliability” réteg 0 (Good data) értéke mellett az 1-es (Marginal data) is használható. Utóbbi pixeleknél az elemzésben való használhatósága függ a műszaki jellegtől, az aeroszol, vagy a felhő mennyiségétől, lehetséges árnyékhathatásokról; legjobb adat a 0. A QA adatok részletes elemzését programozási megoldásokkal hajtottuk végre (Gulácsi és Kovács 2015). A hazai minőségellenőrzés során átlagosan 75% érvényes pixelértéket kaptunk (Kovács et al. 2017) (5. ábra). Az UTM vetületbe kicsomagolt adatokat a minőségkorrekció után, az előfeldolgozás végén az országot lehatárolva a legközelebbi szomszéd módszerrel EOVB-ba transzformáltuk.

Ha a leválogatott erdős cellák minimum 80%-a elemzésre alkalmas, akkor 17 év 96%-át értékelhetjük (3. táblázat: fehér és sötétzöld cellák). A 663 értékből álló idősorban 28 db-ot nem vettünk figyelembe. A nyári félévet jellemző 13 db-os kompozit sorozatoknál 5-re jellemző teljes adatsor (pl. 177) és 4-re a maximum két rossz időpont. A 80%-nál kisebb értékű időpontok képeit korlátozottan vettük figyelembe.



5. ábra Érvényes pixelértékek száma 2000–2014 között (MOD09A1) (Kovács et al. 2017)

3.2. Spektrális indexek és alkalmazásuk

A Red fotoszintetikusan aktív biomasszát értékel, a NIR a levélstruktúra szerint vegetációsűrűséget; különbségük nagy a dús, fejlődő növényzetnél. A '70-es évek óta a VI biztos érték a kvantitatív értékeléshez; a vegetációs információ legalább 90%-a mérhető (Bannari et al. 1995, Huete et al. 2002, Solano et al. 2010). A vegetációs dinamika és szerkezet hullámhossz-specifikusan változik: pigment elnyelés (0,45-0,69 μm), levél visszaverődés (0,76-0,9 μm), nedvességtartalom (1,55-1,75 μm) (Xie et al. 2008). Felszínborítással biofizikai paramétereket nyerhetünk. A VI korrelál a terepi vegetációs mérésekkel, LAI-val (Leaf Area Index), fAPAR-al (elnyelt fotoszintetikusan aktív sugárzás). Hasonló vegetációtípus eltérően jelenhet meg, míg másfélék hasonlóan tűnhetnek azonos LAI és fAPAR esetén (Lunetta et al. 2006).

A vegetációs index adatsora jó fenológiai indikátor; megadható a vegetációs időszak kezdete, vége, csúcsa, az aktivitás növekedési sebessége, trendje. Megfelelő léptékben, a zavaró hatások ellenére – a normalizációval – jól leírja a vegetációt. Empirikusan meghatározott értékhatáraik vannak. A vegetációs karakterrel jellemezzük a mezőgazdasági aszály szintjét hozzájárulva a hatás csökkentéséhez. A '80-as évek óta támogatja a termésbecslést, zöldfelületi kezelést. A műholdas adatsor „zaja” maszkolni tudja a szezonális variációt, ezért azt sokszor nem vizsgálják (Hmimina et al. 2013). Az alapadatok bővülése (Sentinel), időbeli érzékenysége növeli az index adatminőségét. Az IDB-ben rögzített 450 db index funkciója többféle is lehet; Red és NIR különbséggel lehatárolnak elárasztott területeket is (Kugler 2012). Hasonló adattípusok, módszerek kombinációja alkalmazható különböző ökoszisztémákban (Lunetta et al. 2006). Kommunikál közvetlen és közvetett (erózió) környezeti hatásokat.

3. táblázat A MOD13Q1 erdő cellák teljessége (2000–2016)

(L: lomblevelű-, F: fenyő-, V: elegyes erdő)

MOD szám	81	97	113	129	145	161	177	193	209	225	241	257	273
16 nap	03.22-04.06.	04.07-04.22.	04.23-05.08.	05.09-05.24.	05.25-06.09.	06.10-06.25.	06.26-07.11.	07.12-07.27.	07.28-08.12.	08.13-08.28.	08.29-09.13.	09.14-09.29.	09.30-10.15.
2000	<60%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	<80% L/V	100%
2001	100%	>80%	100%	100%	100%	>80%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
2002	100%	100%	100%	100%	>80%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	<80% F/V	100%
2003	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	>80%	100%	100%	100%	100%	100%
2004	100%	100%	100%	100%	>80%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
2005	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
2006	100%	100%	100%	100%	<80% V	100%	100%	100%	<80% L	100%	100%	100%	100%
2007	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
2008	100%	100%	<60%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
2009	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
2010	100%	100%	100%	<60%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	<80% L	100%	100%
2011	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
2012	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
2013	<60%	100%	100%	100%	<60%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
2014	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	>80%	100%	100%	100%	100%
2015	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
2016	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

A VI értéke nőhet a talaj, háttér fedettség, atmoszféra, árnyék, nedvesség-tartalom hatásai miatt. A második generációs indexek által figyelembe vett háttérzajok közepes (40-60%) vegetációnál erősebbek (Bannari et al. 1995, Huete et al. 2002). A nem hibrid indexek specifikus alkalmazásokra jók. A felhők miatt kieső adat más érzékelőkkel, geostacionárius-, radaradattal pótolható. A monitoring gyakorlati alkalmazásához valós idejű elemzés kellene.

Talajvilágosság méréshez az adattérben megadható talajvonalat használják (Bannari et al. 1995). A SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index) és a talajvonallal javított TSAVI arányindexek szenzorfüggetlenek, számíthatók kis LAI-nál, elhaló növényzetnél (Bannari et al. 1995);

$$SAVI = (1+L) * (NIR-Red) / (NIR+Red+L); L=0,5; \quad (Huete 1988)$$

A korrekciónál az atmoszféra ismerete fontosabb, mint az, hogy melyik sugárzásátviteli modellt használjuk. Atmoszférikus érzékeny az ARVI (Atmospherically Resistant VI), de sűrű vegetációnál a talajvonallal módosított TSARVI pontosabb (Bannari et al. 1995).

$$ARVI = (NIR-RB) / (NIR+RB) \quad (Kaufman \text{ és } Tanré 1992)$$

RB = Red-gamma * (Red-Blue); gamma = atm.reflektancia_{Red} / (atm.reflektancia_{Blue} - atm.reflektancia_{Red})

A SWIR reflektancia függ az – instabilitást okozó – víztartalomtól. A LANDSAT-re működő Wetness index (Kauth és Thomas 1976, Kovács 2009) átszámolható más érzékelőkre;

$$WI_{LANDSAT\ 8} = 0,1509_{Blue} + 0,1973_{Green} + 0,3279_{Red} + 0,3406_{NIR} - 0,7112_{SWIR1} - 0,4572_{SWIR2}$$

Az NDWI (Normalized Difference Water Index) az SWIR-ben megnövő reflektanciával gyors választ ad a szárazságra (GU et al. 2007, EDO);

$$NDWI = (NIR - SWIR) / (NIR + SWIR) \quad (Gao 1996)$$

Egy VI nem tud aszályt egy értékben jellemezni. Az NDVI–NDWI kapcsolat is alátámasztja az NDDI-t (Normalized Difference Drought Index) (Gulácsi és Kovács 2015);

$$NDDI = (NDVI - NDWI) / (NDVI + NDWI) \quad (GU \text{ et al. } 2007)$$

A normalizálás elhagyása (DDI, Difference Drought Index) nem feltétlenül gond, igaz a vegetáció- és vízindexeknél a normalizált változatok pontosabbak (Kovács és Gulácsi 2016).

3.2.1. NDVI és EVI, az általánosan használt vegetációs indexek

Vegetációműködés vizsgálatunkban a MOD13Q1 kompozitképek NDVI és EVI (Enhanced Vegetation Index) értékeit használtuk fel. A 2000–2016 közötti időszak VI értékeit tekintve 442 felvétel szerint elemeztünk. Az indexek jellemzői meghatározzák az elemzéssel kapott eredmények értelmezhetőségét.

Az NDVI sok index alapja. Előfeldolgozással csökkenthetik a sugárzás beesési szögét, felhőt és árnyékát, topográfiát, direkt és diffúz sugárzást, atmoszférikus különbséget;

$$NDVI = (NIR-Red) / (NIR+Red) \quad (Rouse \text{ et al. } 1974)$$

A '80-as Szahel övezet-i problémával megjelentek a klíma hatásait vizsgáló NDVI térképezések. Évtizedes NDVI anomáliákkal mutattak ki aszályos időszakokat (Anyamba és Tucker 2012). A kezdetektől működő, 8 km-es adatbázist 2005-től 4 km-es, 7 napos, validált NDVI szolgáltatás váltotta. 2000 óta valós időben, MODIS NDVI-vel vizsgálják a klímaváltozás okozta erdőfenyegetettséget (LANCE program, Norman et al. 2013).

Az AVHRR széles sávjai, nagy pixelai, szenzorai eltéréseket okozhatnak (GIMMS NDVI). AVHRR-MODIS folytonosság egyenletekkel megoldható, de a vegetáció, a talaj, a sávok, a szóródás, az elnyelési ablakok bizonytalanságot okoznak (van Leeuwen et al. 2006). A MODIS kevésbé érzékeny a vízgőzre. A növényi fedettséggel nő a szenzorok VI különbsége, a MODIS NDVI hol magasabb, hol kisebb (van Leeuwen et al. 2006). A MODIS dinamikus tartománya nagyobb még a terepi VI-vel történő összevetésnél is (Hmimina et al. 2013).

Lehatárolja a vegetációs területet, de a nyári félév kezdetén túl-, a félév végén pedig alábecsülhet. A tenyészidőszak kezdetén egyenetlenebb az idősor, mint a szárazodási fázisban. Alacsony Red, magas NIR arány világos talajnál is előállhat és hasonló növényzet ilyen talajon (pl. homok) magasabb NDVI-t ad. Túlbecsül a levélnélküli időszak fedettségét (Ahl et al. 2006). Adott LAI intervallumban ($LAI_{\text{szivatag}}=0$, $LAI_{\text{esőerdő}}=8$) a VI-k egy telítettségi szinthez tartanak (Huete et al. 2002). A kizöldülés a lombozat alatti résznek köszönhető, amely a vizsgált mennyiség 14%-a is lehet. Emiatt lehetséges a korábbi kizöldülés és ezért stabil a VI maximum lombhullatáskor. A sok biomasszával bíró erdőterületek NDVI-je tendál a telítettség felé. Az aktív vegetáció magas jelei skálázási problémát okoznak. Biológiaiailag összetett területen az NDVI jó a felszín változás-értékelésében (Lunetta et al. 2006, Zargar et al. 2011), amit MOD13Q1 NDVI-vel is bizonyítottak. Felszíni heterogenitásra jellemző érzékenysége miatt le kell leválogatni a növényzetet.

A '80-as évek óta ismert a fotoszintetikus aktivitás és a csapadékmennyiség kapcsolat a szemi-arid területeken (Anyamba és Tucker 2012). A kapcsolat nem lineáris, de a 06-07. hónapokban erősebb. A csapadék várható változásai a biomassza-produktumban mérhetők, de az időjárás, a talaj, -víz és -nedvesség, a vegetáció-típus, -növekedés mellett befolyásolók az egyedi helyzetek (csapadék), a regionális mintázat, az idő- és térbeliség. Számolni kell az emberi hatásokkal (öntözés). Fontosak a szezonális elemzések, bár kis évszakos variációnál nem tűnik fel a szárazság. Kis víztartalom-megtartó talajnál a legerősebb az NDVI–SPI kapocs. AVHRR NDVI gyepek és szántóföldi adatsornak a 3 hónapos SPI-vel legerősebb a kapcsolata (Ji és Peters 2003). Nedves ökoszisztémák elérhetik az NDVI maximumot miközben a csapadék még nő (Anyamba és Tucker 2012).

A MODIS-nál előny a keskenyebb Red, de az atmoszférikus korrekció hibái a reflektancia 1,5–5%-át tehetik ki, ami dús vegetációnál nagyobb eltérést okozhat. Kalibrációs bizonytalanság 1,8% (van Leeuwen et al. 2006). Nagyobb VI-nél nagyobb a Rayleigh szóródás hiba, ami a dinamikusabb tartományokban 10% is lehet. Aeroszol hatásra csökken az NDVI (főleg a magasabb NDVI). Ózon elnyelés 1% NDVI hibát is okozhat. Ahl et al. (2006) +/- 0,04-es elfogadható MODIS NDVI hibával is kalkulál, ami az eleve kis értékváltozásokat mutató adatsorunkban fontos paraméter lehet.

A VCI (Vegetation Condition Index) relatív értékek alapján szabványosítja az NDVI-t;

$$VCI = 100 * (NDVI_o - NDVI_{\min}) / (NDVI_{\max} - NDVI_{\min}) \quad (\text{Kogan 1990})$$

$NDVI_o$: cella aktuális index érték; $NDVI_{\min}$ és $NDVI_{\max}$: vizsgált időtartam minimum, illetve maximum értéke

A VCI és a termális sáv alapú TCI (Temperature Conditional Index) kombinációja az aszálymegfigyelés alapját adó VHI (Vegetation Health Index) (Kogan 1995, NOAA STAR). A hőmérséklet és nedvesség kapcsolatát felismerve VI alapján számolják a talajnedvességet (SMI); a különböző növényzeti sűrűséget adó VI osztályok MODIS LST (Land Surface Temperature) szerinti minimum SMI értéke 1 lesz, az LST_{max} SMI értéke 0. Az átszámított VI osztályokat egyesítve kapjuk a talajnedvességi térképet (van Leeuwen et al. 2014).

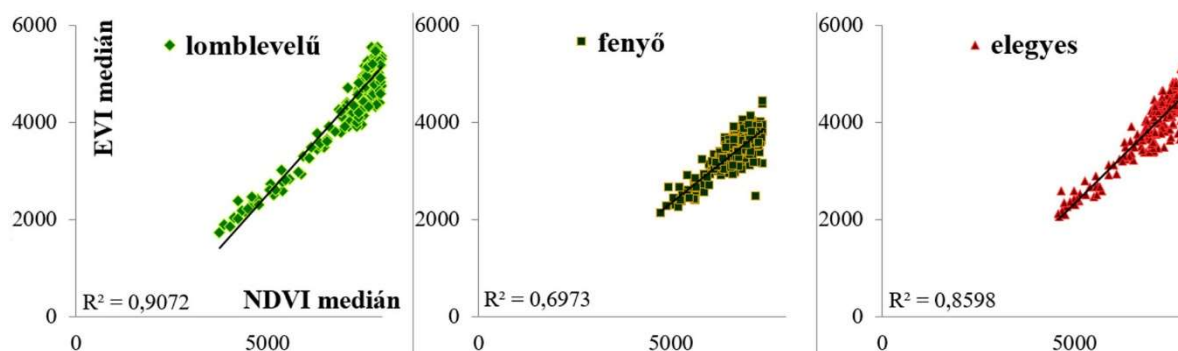
Alapadatunk az ARVI és a SAVI kombinációjaként készült EVI is. Pontos a biomassza-produktum, a felszíni struktúra-változás értékelésénél; érzékeny a magas biomasszára. Redukálja a felszíni és az atmoszférikus hatásokat és elkülöníthetők a lombozatról és a háttéréből érkező jelek. Nagyobb aeroszol koncentráció nagyobb különbséget okoz a sávoknál; így stabilizálható az index. Pontosabban becsüli a lombozat borítottságát, fajtáját, állapotát (Solano et al. 2010). Az AVHRR NDVI helyét a MODIS EVI/LAI megoldások vették át (Ahl et al. 2006). Az óriási adatbázisban az éves, évszakos változás-változékonyság megkülönböztethető. Érzékeny az erdőtípusokra, a tűlevelű- és a lombos erdő EVI között 1,5-szeres az eltérés. Hangsúlyosabb a csökkenés a levélvesztés idején (Huete et al. 2002). Éves adatsorban lombos erdőről van szó, ha az EVI meghaladja a maximum 50%-át (Cuba et al. 2013).

A főként <0,1 Blue a subpixel felhők és aeroszolok miatt magasabb lehet, így a Blue-val javítva az index stabilabb; $L=1$ (lombozat háttér igazítás), $C_1=6$, $C_2=7,5$ (aeroszol-ellenállás együtttható), $G=2,5$ (skálázási tényező). Gond esetére van a 2 sávós EVI (Solano et al. 2010);

$$EVI = G * (NIR - Red) / (NIR + C_1 * Red + C_2 * Blue + L) \quad (\text{Liu és Huete 1995})$$

$$EVI_{2 \text{ sáv}} = 2,5 * (NIR - Red) / (NIR + Red + 1)$$

Az 500 és 1000 m-es, 16 napos MVC VI a szögfüggéssel és atmoszférától való függéssel együtt jól becsül, összeegyeztethető a légifelvételéssel (Huete et al. 2002). Az EVI simább, szimmetrikusabb évszakos profilú, jobban definiált csúccsal, értéke az NDVI-nél alacsonyabb, szűkebb tartománya előny a „telítettség” kiküszöbölésében. A kétféle VI erdőknél általában nem korrelál, de mintaterületi értékeink ezt nem igazolják; a lomblevelűnél és elegyesnél erősebb a kapcsolat (6. ábra). A telítettségi problémát jellemzi az indexérték különbség. A füves-cserjés közötti különbség – ahol az EVI_{\max} 0,4 és $NDVI_{\max}$ 0,7 – az erdőknél lecsökken; az EVI_{\max} 0,8 és $NDVI_{\max}$ 0,9 (Huete et al. 2002). Az NDVI és EVI kiegészítik egymást, így eredményesebb a változás-detektálás és a biofizikai paraméterek kinyerése. 32 napos MODIS MVC adatsorban az NDVI pontosabb volt az erdős-cserjés vizsgálatokor (Li et al. 2010).



6. ábra EVI és NDVI értékek kapcsolata a Duna-Tisza köze erdőterületein (2000–2016)

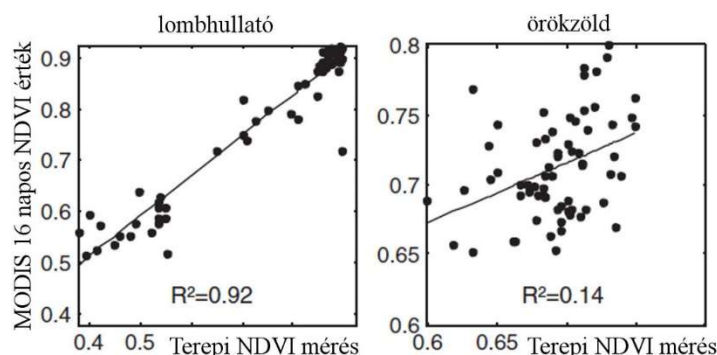
A standardizált anomália variabilitása kifejező az évek közötti vizsgálatban.

$$EVI_{\text{standardizált}} = (EVI_{i,j} - EVI_{\text{átlag},i,j}) / EVI_{\text{szórás},i,j}$$

A MODIS VI standardizált anomália a Duna-Tisza köze területhasználatára vizsgálva aszályos években jelentős negatív eltérést mutatott (pl. 2003, 2012) (Ladányi és Blanka 2014). Az éves PaDI és VI anomália átlagok együtt futása a szántókon is jellemző. A térbeliséget jól szemléltetik a nem extrém aszályos évek (2002). A nem homoktalajon lévő erdők a csapadékos évek vizes háttére miatt alacsony VI-t mutathatnak.

A 120–200. napok közötti idő fenológiáját MODIS termékekkel értékelve legjobb egyezést a lombkorona kiteljesedésének kezdete és az 1 km-es MOD15 LAI mutatta, ami a terepi mérés (Plant Area Index) maximumtól csak 7%-ban tért el. Napi mérésű MOD09 NDVI alapján a kizöldülés és a lombkorona kiteljesedésének kezdete között 21 nap van, így a 8 és 16 napos MVC alul-, illetve felülbecsüli a fenológiai állapotot, ezért az időfelbontást egy hét alatti értékre növelhetnénk; Terra és Aqua együtt kezelése fontos lenne (Ahl et al. 2006). Terepi és MODIS NDVI mérések közötti kapcsolat a lomblevelű erdőknél (tölgy, bükk) elsősorban a kizöldülés és dúsulás időpontjaiban szignifikáns (Hmamini et al. 2013). Az eredmények alapján illesztett modell inflexiós pontjai kevesebb, mint 1 hetes eltéréssel illeszkednek a zöldülés (tavasz) és a sárgulás (ősz) időpontjaira. A 16 napos MODIS maximum 1,5–7 napos eltéréssel alkalmas a tavaszi NDVI görbe és ez alapján az inflexiós pont megadására, mert előfeldolgozásuk megbízhatóbb a napi adatokénál. A (mediterrán) örökzöldek kisebb variációjú NDVI-i nem egyeznek a terepi méréssel (7. ábra). Az 1 km-es MOD13A3 EVI-t az LST (MOD11C3) és csapadék (TRMM) adatokkal összevetve száraz időszakban az EVI–LST, míg sűrű vegetáció esetén az EVI–csapadék között erős a korreláció (Cuba et al. 2013). Mintaterületünkön

száraz időszak és a sűrű vegetáció is előfordul, ezért a csapadék és hőmérséklet adatokat egyesítő PAI indexszel való kapcsolatot néztük meg.



7. ábra Terepi NDVI és MODIS 16 napos NDVI értékek erdők esetén (Hmamini et al. 2013)

Duna-Tisza köze erdőterületei alapján már egy évtizedes biomassza-produktummal is értékelhetők klimatikus hatások (Kovács 2012), melynek térbeli elemzésébe a VI-k mellett az SPI is bevonható (Zsákovics et. al 2009). Farkas et al. (2015) 4 km-re degradált, MODIS alapú szántóföldi biomassza-produkciója az öntözés mellett is függ a csapadéktól, így aszálynál nem megoldott a termésbiztonság. Alkalmazkodással, jó öntözési gyakorlattal kell tervezni.

4. Erdős vegetáció minőségi-mennyiségi értékelése 2000–2016 között a Duna-Tisza közén

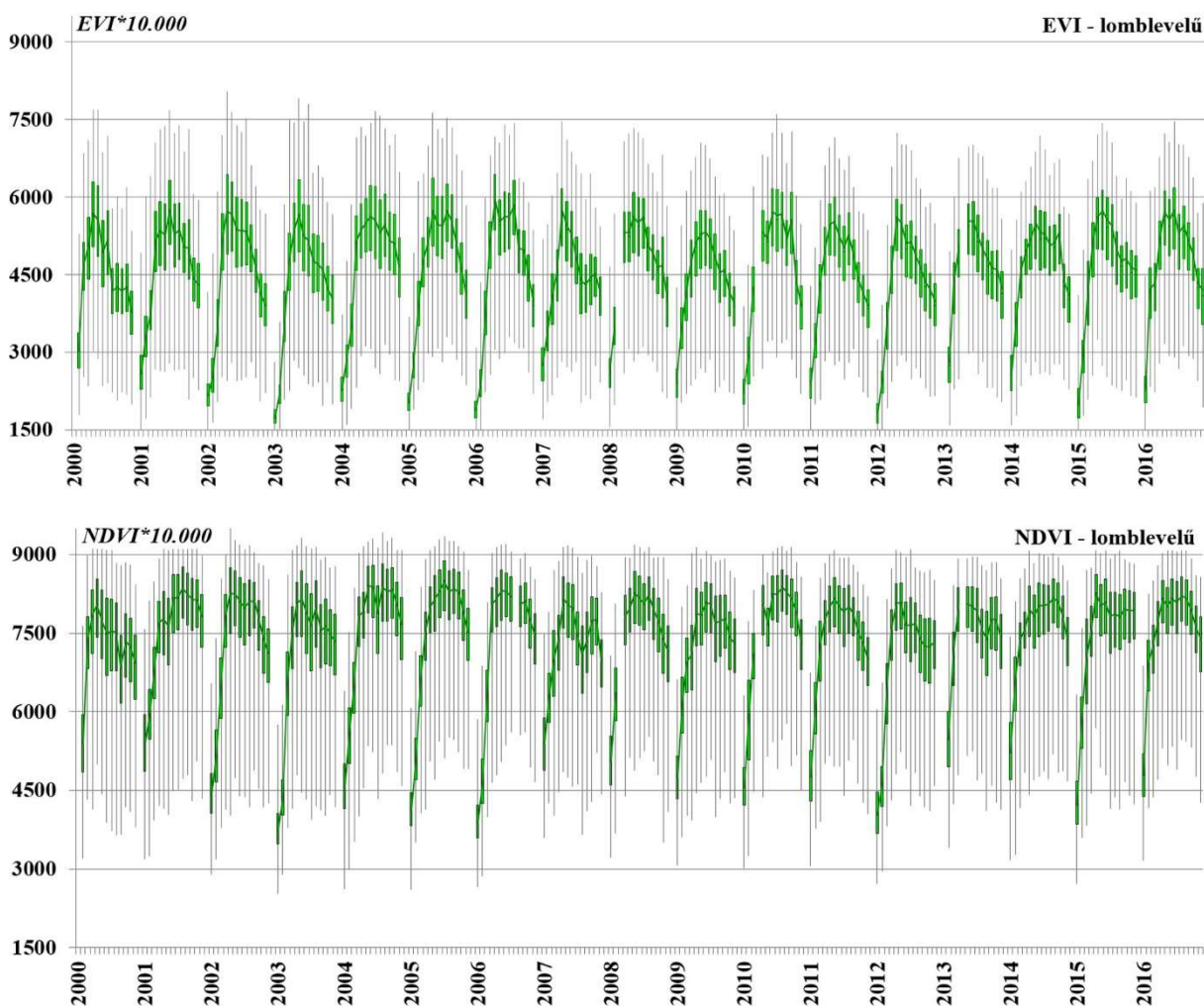
4.2. A vegetációs index idősorok jellemzése

A 2000–2016 között az EVI adatsor az NDVI-nél szabályosabb, a külső hatásokra érzékenyebb, valós képet mutat, az évszakos variációban feltűnik a szárazság (Kovács és Gulácsi 2016). A magas index átlagok igazolják az erdő lehatárolást, különbségeik mindkét VI figyelembe vételének jogosságát (8. ábra). A szűk értéktartományok előrevetítik a kisebb változások jelentőségét, de az Ahl et al. (2006) szerinti +/- 0,04-es elfogadható MODIS NDVI hibával is érdemes kalkulálni. A lomblevelű EVI esetében készített, CLC 2000–2012 szerinti állandó erdők teszt adatsor igazolta, hogy a térképezési különbségek nem befolyásolják a 17 év jellemző állapotait. Az erdőkategóriák görbéinek relatív, év közbeni futása hasonló (Kovács 2012), de több évben is előfordul különböző mértékű változékonyság (pl. 2007, 2013), a megszokottól eltérő jelleg (pl. 2014-16). A medián értékek jelzik az NDVI telítettségi problémát ($NDVI_{lomb}$: 0,37–0,85, illetve EVI_{lomb} : 0,17–0,59). A tűlevelűnél az EVI már 50%-al kisebb.

A legintenzívebb év közbeni változás a tavaszi növekedés, amikor a lomblevelű VI mediánok május végéig 0,08-0,12-vel (akár +0,2-vel) nőnek egy-egy 16 napos időszak alatt. A nyári félév végén, augusztus-szeptember-ben csökkenést jellemzően csak az EVI mutat (-0,1–-0,17). Az NDVI és EVI idősorok nem mutatnak trendszerű változást, amiben nagy szerepe van a 2014-16 időszak kedvező értékekkel bíró csapadékviszonyainak.

Földrajzi kapcsolat látható 2001, 2004-2006, 2008, 2010, 2014, 2016 években, amikor a sokéves átlagot tartósan meghaladó csapadéértékek és az átlagnál hűvösebb nyári félévek révén jellemző a dúsabb vegetáció és a csapadékeloszlás miatti kétcsúcsú VI görbe. 2005 és 2006-ban a nyárvégi második maximum VI érték a magasabb! A kedvező, csapadékosabb állapot növekvő VI értékei a kevésbé esős – és az általános pozitív hőmérsékleti eltéréssel bíró – években gyorsan csökkenek; pl. 2004-2006 utáni 2007. évre (Kovács et al. 2017). Az egyedülálló nedves évek (2001, 2010, 2014), illetve aszályos évek (2015) magasabb, illetve alacsonyabb értékei nem kiugrók a környező évek kedvezőtlen, illetve kedvező hatásai miatt. 2003 és 2004, illetve 2012 és 2013 összevetésénél látszódik, hogy az aszályos évek alacsony értékei vízutánpótlás esetén gyorsan megnőnek. A legalacsonyabb, illetve legmagasabb VI értékű éveknél sincs egyezés az erdőtípusok között; az $NDVI_{fenyő}$ esetében a 2000. év adja a legalacsonyabb értéket, míg ez az év a $NDVI_{lomb}$ -nál a legjobb 5 év egyike. 2006 csak tűlevelűeknél a legmagasabb átlaggal bíró év. 2003, 2012, 2009 általában a leggyengébb VI értékek

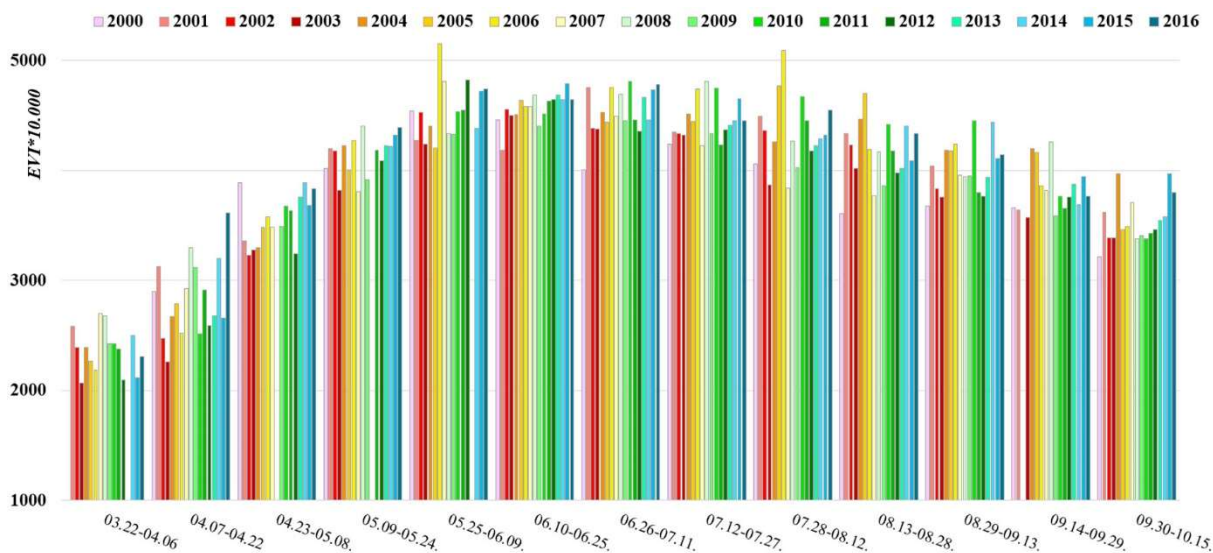
sorrendje, míg a legerősebbeké 2016, 2006, 2008, 2001. A pozitív és a negatív eltérések is jellemzően külön években és nem egybefüggő időszakban fordulnak elő. Csökkenési folyamat a maximum 2-5, egymást követő szárazabb időszak esetén jellemző, amelyeket rendszerint egy csapadékosabb év „állít meg”, ami elég a fás biomassa produktumnak, hogy hosszabb távon ne csökkenjen. 3-4 éves periódusok jellemzők, amelyek jól kivehetők például az éves mediánál, vagy a kisebb adattartományú $VI_{fenyő}$ -nél. Csökkenési idősorok NDVI/EVI esetében: 2001-2003, 2006-2009 (NDVI esetében 2005-2009), 2010-2013. Érdekes az éves átlagok szerint csökkenő 2004-2007, illetve 2008-2012, de ezt a 8. ábra idősora nem támasztja alá. Az adatok változékonyságát jellemzi, hogy egy esős év adott hónapokban olyan alacsony EVI-vel bírhat, mint a szárazabb évek; 2010. év például a 17 év legalacsonyabb június közepi értékét adja, igaz a további időközökben szeptemberig egyre jobban kimagaslik a környezetéből. Jellemző a 16 napos MVC VI-k legmagasabb 1%-át tartalmazó maximális biomassa produkció VI_{lomb} csökkenése. A maximális EVI_{lomb} 2002-2003 évek óta, míg a maximális NDVI minden erdőre 2005 óta lassan csökkenő. A pozitív hőmérsékleti és negatív csapadékelterési adatok, alacsony talajvízszint értékek, valamint a gyenge vízborítottságú időszakok által kijelölt 2000–2003, 2006.09–2009.09. magyarázza a csökkenő biomasszát (Kovács 2012, 2013).



8. ábra Lomblevelű erdők EVI/NDVI medián értékeinek alakulása (2000–2016)

A VI_{lomb} növekedést mutat a 03.22–05.08. tavaszi időszakban. A 2000–2006, 2007–2012, 2013–2016 három időszak fokozatosan 20%-al (az index összege szerint 40%-al) emelkedő tavaszi EVI produktíót mutat. A vegetációt jellemző szint jelentősen változik, nő. A lomblevelűeknél az ezredfordulóra jellemző 0,33 helyett ma már 0,49! E szerint igazolódhatnak a melegedés miatt egyre gyorsabb, intenzívebb kizöldülést mérő (Varga et al. 2012, Szabó. et

al. 2016) és prognosztizáló elemzések (Kovács 2012). Bár a tavaszi intenzitás nő, maga a biomassza produkciós csúcs elérésének ideje (05.25–07.11. között) és a lomblevelű produktivitás mennyisége jellemzően nem változik. A VI_{elegyes} erdő nem csak tavasszal, hanem a legnagyobb értékeknél is növekedést mutat; a legerősebb trend jelleg ($R^2=0,44$) az 06.10–06.25-ös időszakra jellemző (9. ábra). A növekedés relatív értékkülönbsége a lomblevelűnél kisebb, de a 17 éves adatsor alapján azzal hasonló mértékű (vagy intenzívebb). Ebben az esetben nemcsak a kizöldülés egyre gyorsabb, intenzívebb, hanem maga a produkció mennyisége is nő. Az elegyes erdőnél általánosak a másodlagos csúcsertékek, ami a növekvő produkciós értékkel együtt dúsuló vegetációra utal. Hosszabb, csökkenést mutató időszakot csak az NDVI-nél tapasztalunk a 06.26–07.11-nél 2006–2012 között. Erdészeti szempontból kedvező, hogy a faállomány-növedék 80%-át adó 03–05–07. havi intenzív vízfelhasználás és a klimatológia szerint megadott tavaszi szignifikáns csapadécsökkenés között elemzéseinkben nem látható kapcsolat (Kovács 2007, 2012). Illancsi erdőfoltok MODIS biomassza-produktum vizsgálatában a III–V, és VI. hónapok csapadéka bizonyult meghatározónak (Rakonczi et al. 2012). Hosszabb, csökkenő tavaszi időszak csak az NDVI-nél jellemző a 04.23–05.08. időben 2000–2006 között.



9. ábra Elegyes erdő EVI medián értékek alakulása (2000–2016)

A tavaszi $VI_{\text{fenyő}}$ -nél csak a korai 03.22–04.06-os időszakban beszélhetünk kismértékű emelkedésről. Az $NDVI_{\text{fenyő}}$ csúcsa a lomb- és elegyes erdőkre jellemző 3 időszak helyett 6-ban is előfordul, 2010-ben például augusztus közepéig nő! Feltűnő az $EVI_{\text{fenyő}}$ 06.10–06.25. közötti szinte monoton növekedése a 17 év alatt. Az $NDVI_{\text{fenyő}}$ minden évben rendelkezik másodlagos maximummal, ami gyakran a szeptemberi időkben van. Értékeink alakulása nem támasztja alá a fenyők gyengülésére vonatkozó erdészeti előrejelzéseket (Mátyás et al. 2010).

A fő aszályos periódusokban, a változékony 07.17–09.13. időszakokban az évek közötti ingadozás is megnő. Jellemzők az egymást követő csapadékos/száraz évek közötti – akár 1,2-es medián – különbségek (2000/2001, 2003/2004, 2006/2007, 2010/2011-2012). A megnövekedett EVI különbségekkel a vegetáció ekkor jellemzően a nedvességi viszonyokat. A csapadékosabb évek után következő száraz év hatása azonnal visszaveti a zöldtömeget (Kovács 2007, Kovács et al. 2017). A klimatológia egyre aszályosabb időt jelez előre, így a csökkenések tartóssá válnak; egyre több, a 2000, 2007, illetve 2011. évhez hasonló helyzet alakulhat ki (Gulácsi és Kovács 2015). Hosszabb, csökkenést mutató időszakok a lomblevelű és elegyes esetében is a 09.14–09.29-es idő nevezhető meg 2004–2012 között. Az utolsó, 09.30–10.15-ei időszak EVI_{elegyes} emelkedő értékei – a lomblevelűvel ellentétben – a növekvő tavaszi értékekkel együtt alátámasztják a teljes vegetációs periódus növekedését. A VI adatsorban

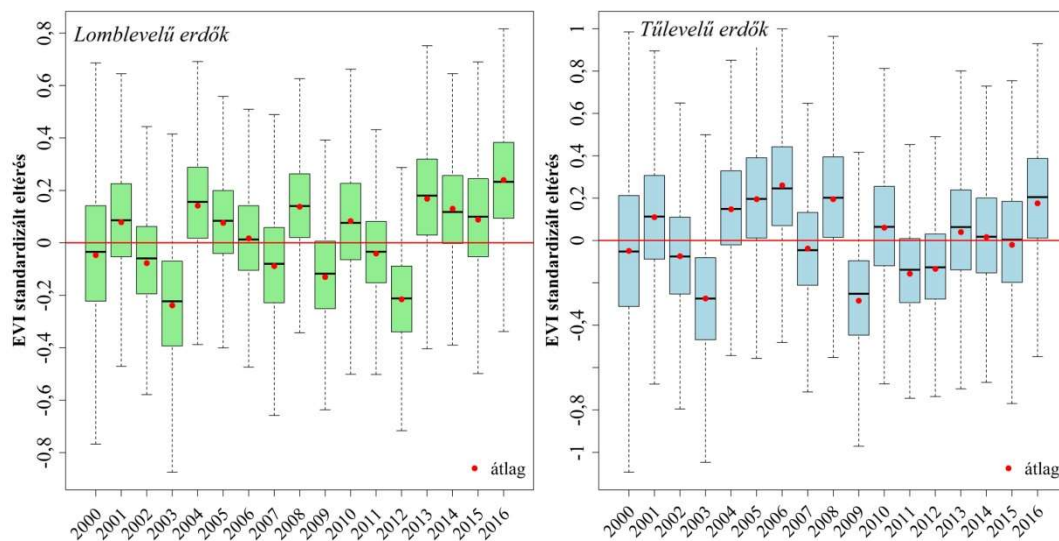
tapasztaltak alapján, ha a csapadék nem is mutat csökkenést, a biztosan jelentkező melegedés miatt fokozódó párolgás, valószínűsíti a produktum csökkenését.

A mintaterület NDVI, illetve EVI értékeit összeadva számoltuk a biomassza produktumot. Az 1. ábra szerinti lomblevelű-elegyes-tülevelű felszínfedettségi megoszlást ismerve a biomassza-mennyiségre jellemző ezredfordulós 53-14-33% arány aktuálisan ma már 62-11-27%, így 17 év alatt csak a lomboserdő biomassza összértéke nőtt.

Területegységre (ha) számolt biomassza produktum értékei a mediánhoz hasonló futást mutatnak, de a változás mértéke az átlagnál tapasztalt kétszerese. A tavaszi-kora nyári időszakban egy hónapon belül is 35-65%-al nőhet a lomblevelű vegetációs mennyisége. A lomblevelű és elegyes VI-k szerint is 3-4 éves periódusok jelölhetők ki; 2000–2003, 2004–2007, 2008–2012 és 2013-tól napjainkig. A periódusok elejét és végét jelző szomszédos évek közötti különbség 5–9 % (2003 vs. 2004, 2012 vs. 2013). Lomblevelű/elegyes EVI szerint 2004, 2008, 2016. években a legtöbb a zöldtömeg, míg az NDVI-nél ugyanilyen magas értékű 2001, 2005, 2010, 2013, 2014 is. A 2008. év ebben az összesítésben a legmagasabb értékű, produktív év, amit a meteorológiai körülmények és az eddigi adatsor sem támasztanak alá. 2003 és 2012 adják a legalacsonyabb értékeket (Kovács és Gulácsi 2016).

4.2. Az átlagtól való eltérés vizsgálata

Az EVI standardizált eltérések esetén a biomassza produktumnál is tapasztalt periódusok rajzolódnak ki: 2000–2003, illetve 2007–2012 változékonny, de inkább aszályos éveket a 2004–2006, illetve 2013–2016 közötti átlagos és pozitív eltérésű évek határolják (10. ábra).

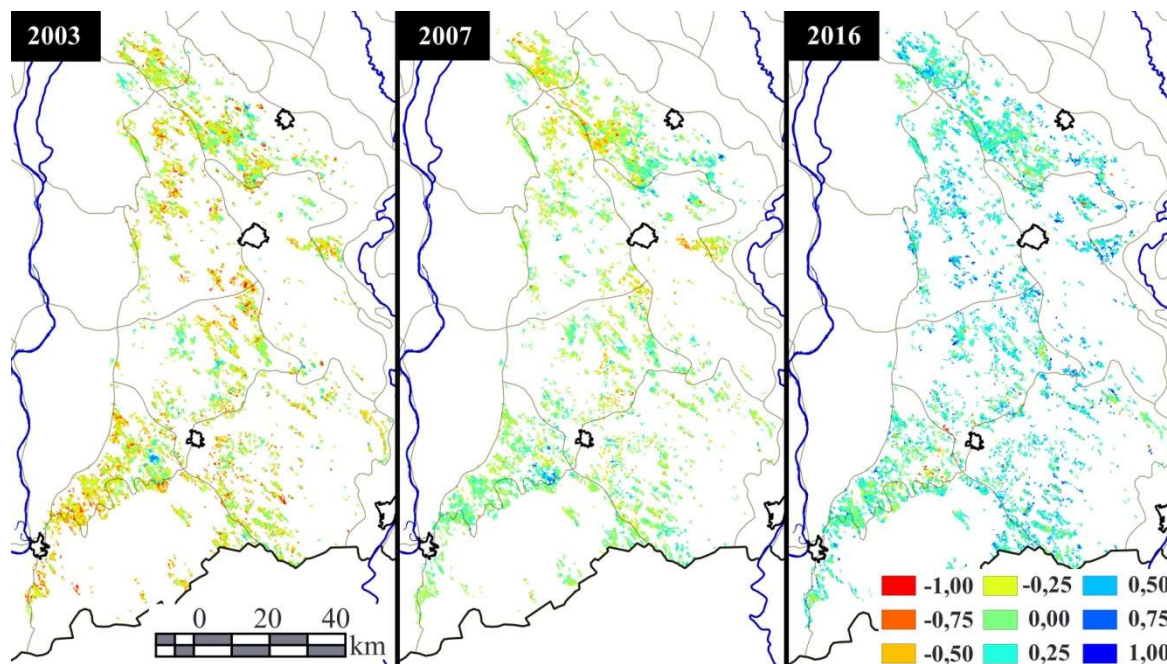


10. ábra EVI standardizált eltérése a 2000–2016 átlagtól két erdőkategóriánál

A lomblevelű erdők (elegyes erdőknél kevésbé) szerint látható, hogy egy kedvező körülményekkel szolgáló év fellendülése után éveken át tartó csökkenés jellemző egy újabb pozitív évig; csökkenő periódusok a 2001–2003, 2004–2007, 2008–2012. A periódusok végén a negatív eltéréseket, az azokat 1,3-1,8-szorosan meghaladó pozitív eltérések zárják le. A 2013. év óta állandósult a biomassza produktum többlet. Egymást követően rosszabb viszonyok csak 2 évig jellemzők. Legrosszabb a 2007–2012-es 6 éves időszak 4 db átlag alatti évvel. A 2003. év aszályossága jól látszódik, de a lomblevelű esetében 2012, a tülevelűnél pedig 2009 hasonlóan negatív. Kettős megítélésűek a 2006. és a 2014–2015. évek. A pozitív eltérésű 2004–2006 között a lomblevelű folyamatosan csökken, míg a tülevelű nő. 2013–2016 közötti lomblevelű eltérés sokkal nagyobb, a tülevelűnél ez a három év átlagosnak mondható.

A standardizált EVI vizsgálatban a pixelenkénti átlagértékek figyelembe vételével a helyi hatások is szerepet kapnak (11. ábra). A referenciaszinttől való eltérés időbeli és térbeli vizsgálata kijelöli a biomasszamennyiség-csökkenés miatt veszélyben lévő területeket. A tartós el-

térések, veszélyeztetettségi szintek, amelyek a vízhiányt okozó klímaváltozás hatására adott vegetációs válaszok. 2000–2011 időszak vizsgálata alapján az erdők 25 %-a klímaváltozási szempontból veszélyeztetett (Kovács 2012).



11. ábra 2000 –2016 MOD13Q1 EVI adatsor alapján standardizált EVI térbeli eloszlása a Duna-Tisza közti erdők esetén a 2003, 2007, 2016. évek példáján

Az éves eltéréseket tekintve a térképezés alapján adott időszakokban (2000–2005, 2006–2011, 2012–2016) az ezredforduló utáni aszályosabb évek negatív eltérései a 2006-tól kezdődő időszakban átlagosabbá váltak, majd 2012-től jobban elkülönülnek az erősödő és a gyengülő erdők. Az aszályosság mértékénél az első térképezési időszakban a másodikhoz képest több, mint négyszer akkora terület határozhatunk meg az eltérés alapján a lomblevelűeknél és az elegyes erdőknél egyaránt, sőt az elegyes erdők aszályossága a harmadik térképezési időszak első éveiben (2012–2014) nőtt a megelőző – 2006–2011-es – időszakhoz képest. A fenyő nem mutat jellemző különbségeket, mindhárom időszakra hasonló mennyiségű aszályos terület jellemzi.

A 11. ábra szerinti térképezéssel a tervezés számára pontosan megadjuk azokat a foltokat ahol a negatív eltérések jellemzők. Ilyen tapasztalható elszórta a Pilis-Alpári-homokháton, főleg a lomblevelűeknél, 50-55 ha-os egybefüggő foltokon is. Ilyen minőségben fenyőfoltok vannak a Kiskunsági-homokhát közepén, a Dorozsma-Majsai-homokhát NY-i részén, de jellemzőbb a Bugaci-homokhát középső és K-i része, az Illancs K-i része, ahol az elegyes erdőkkel együtt több, 200-250 ha-os egybefüggő erdő is jellemzően negatív eltérésű. Jellemzően pozitív eltéréseket a Dorozsma-Majsai-homokhát közepén, a Bugaci-homokhát É-i és a Kiskunsági-homokhát D-i felén találunk. A jelentősebb biomasz különbséggel bíró szomszédos éveknél jellemzően a Duna-Tisza köze É-i és DNY-i részén csökkent a produkció.

4.3. EVI és NDVI értékek validációja

A terepi méréseken alapuló PAI (Pálfi-féle aszályindex) értékei a CARPATCLIM 2000–2010 közötti időszakra, 10 km felbontásban rendelkezésre állnak. Azokkal a PAI értékű cellákkal vetettük össze a NDVI/EVI értékeinket, amelyek tartalmazzák a mintaterület MODIS erdős celláit. Az EVI és NDVI átlagképekkel való összevetésnél a lineáris regressziót erdőkategóriánként külön végeztük. Minden esetben statisztikailag szignifikáns kapcsolat ($p < 0,001$) mutatkozott a VI-k és a PAI átlagok között. Az alapértelmezett Pearson-féle korrelációs

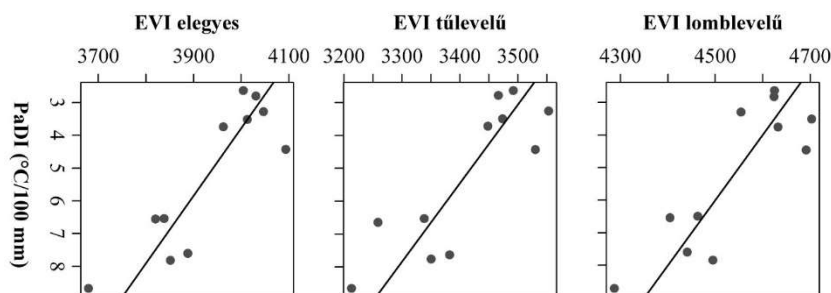
együtthatók (r) szerint a determinációs együtthatók (r^2 értékek) 0,72–0,85 közötti tartományban mozognak, ami kapcsolatot mutat a 250 m felbontású EVI/NDVI és a PAI között (4. táblázat). Ez igazolja a korábbi, 500 m-es felbontású – NDDI/NDWI-t is vizsgáló – eredményeinket, ahol az EVI-t illetően csak a júliusi időszakok, egész Alföldet érintő vizsgálatok mutatnak erősebb kapcsolatot a 8 napos MVC adatok ($r^2=0,78$) (Gulácsi és Kovács 2015). Kisebb erdőfoltok biomassa produkciója is nagymértékben függ a csapadék és hőmérséklet viszonyoktól, amely jól visszatükröződik az illancsi erdős vegetáció és a PAI aszályindex szoros kapcsolatában. Ebben az esetben a lineáris regresszió vizsgálat eredményeül kapott alacsonyabb determinációs koefficiens értékek ($0,259 < r^2 < 0,424$), oka a helyi módosító tényezőkben keresendő (Kovács et al. 2017).

4. táblázat NDVI és EVI kapcsolata PAI értékekkel 2000–2010 éves átlagai alapján

Kategória	NDVI~PAI (r^2)	EVI~PAI (r^2)
Lomblevelű erdők	0,76 ***	0,72 ***
Tülevelű erdők	0,74 ***	0,72 ***
Elegyes erdők	0,85 ***	0,76 ***

*** $p < 0,001$

Az aszályos és nem aszályos évek adatpontjai két, jól elkülönülő csoportot képeznek; PaDI > 5-6 értékek felett aszályosnak tekinthető egy év (12. ábra).



12. ábra Erdőkategóriák EVI értékeinek kapcsolata PAI értékekkel 2000–2010 között

5. Összefoglalás

A 2000–2016 közötti teljes vegetációs index adatsorokban az erdő biomassa produktuma összességében egyik erdőkategória szerint sem mutat trendszerű változást. A klímaváltozás földrajzi hatásaként az extrém vízhiányos évek/időszakok értékelése az erdős vegetációban, az eltérések statisztikai és térbeli megjelenésével jól értékelhető. Ezek gyakoribb előfordulása már rövidebb idősorban megfigyelhető csökkenést is mutat; ez jellemző például a 2004-2012 között a lomblevelű erdőknél. A lomblevelű, elegyes és tülevelű biomassa-produktumra jellemző alapvető különbségek jelzik, hogy a folyamatok csak ebben az egy tájalkotó tényezőben is összetettek. Szintén jól értékelhetők a vegetációs periódus egy-egy időszakának jellemző módosulásai már a viszonylag rövid, 17 éves adatsorban is, ilyen a tavaszi intenzitás változása, vagy a nyári produktum növekedése.

Az évközi változások a közel két évtizedes időtávban jelenleg kiegyenlítődnek és évtizedes léptékben stabil állapotúak, de az erdők rövid időtartamon belül sérülékenyek. A változékonyságon látható a vegetáció környezeti hatásokra adott – gyors – válasza. A klimatológiai előrejelzések alapján a melegedés folyamata, illetve az extrém száraz, aszályos időszakok előfordulásának gyakorisága a közeljövőben biztosan fokozódni fog, ami tartóssá teszi a jelenleg még rövidebb időszakra jellemző biomassa-produktum csökkenést.

A folyamatok összetettsége miatt az aridifikációs kutatásokban érdemes törekedni a szintézis alapú gyakorlati javaslatok megfogalmazására, amelyben a vegetációmonitoring használatát már több ingyenes, nagy felbontású távérzékelési adatbázis szolgáltatás is támogatja. Vizsgálataink új eredményei a több érzékelőnél is tapasztalható távérzékelési adatszolgáltatás

minőségi javulásának köszönhető. Az adatbázisok a tanulmányban használt módszerekkel jó eredményekkel szolgálhatnak az operatíván működő, közel valós idejű, automatikus változás-érzékelés létrehozásához.

Irodalomjegyzék:

- Ahl, D.E.; Stith, T.G.; Sean, N.B.; Nikolay, V.S.; Myneni, R.B.; Knyazikhin, Y. 2006. Monitoring spring canopy phenology of a deciduous broadleaf forest using MODIS. *Remote Sensing of Environment* 104, pp.88-95.
- Anyamba, A.; Tucker, C.J. 2012. Historical perspectives on AVHRR NDVI and vegetation drought monitoring. In.: Wardlaw, B.D.; Anderson, M.C.; Verdin, J.P. (eds.) *Remote sensing of drought: innovative monitoring approaches*, CRC Press, pp.23-44.
- Bannari, A.; Morin, D.; Bonn, F.; Huete, A.R. 1995. A review of vegetation indices. *Remote Sensing Reviews* 13. pp.95-120.
- Bartholy, J.; Horányi, A.; Krüzselyi, I.; Pieczka, I.; Pongrácz, R. et al. 2011. A várható éghajlatváltozás dinamikus modelleredmények alapján. In.: Bartholy, J.; Bozó, L.; Haszpra, L. (szerk.) *Klimaváltozás – 2011, Klímaszcenáriók a Kárpát-medence térségére*. pp. 170-235.
- Blanka, V.; Ladányi, Zs.; Mezösi, G. 2014. A jövőben várható klímaváltozás a régióban. In.: Blanka, V.; Ladányi, Zs. (szerk.) *Aszály és vízgazdálkodás a Dél-Alföldön és a Vajdaságban / Drought and water management in South Hungary and Vojvodina*. SZTE, Természeti Földrajzi Tanszék Szeged, pp.142-151.
- Cuba, N.; Rogan, J.; Christman, Z.; Williams, C.A.; Schneider, L.C. et al. 2013. Modelling dry season deciduousness in Mexican Yucatán forest using MODIS EVI data (2000–2011). *GIScience & Remote Sensing* 50 (1), pp.26-49.
- Czúcz, B., Molnár, Zs., Horváth, F.; Botta-Dukát, Z. 2008. The natural capital index of Hungary. *Acta Botanica Hungarica* 50 (Suppl.), pp.161-177
- Czúcz, B.; Gálhidy, L.; Mátyás, Cs. 2010. Limiting climatic factors and potential future distribution of beech (*Fagus sylvatica* L.) and sessile oak (*Quercus petraea* (Mattuscha) Liebl.) forests near their low altitude - xeric limit in Central Europe. *Annals of Forest Science* 68 (1), pp.99-108.
- Csorba, P. 2013. Mérési lehetőségek a geográfiában, a tájökológiában In.: Konkoly-Gyúró, É.; Tirászi, Á.; Nagy, G. (szerk.) *Tájtudomány-Tájtervezés*. Sopron, pp.7-12.
- Csorba, P.; Blanka, V.; Vass, R.; Nagy, R.; Mezösi, G.; Meyer, B. 2012. Hazai tájak működésének veszélyeztetettsége új klímaváltozási előrejelzés alapján. *Földrajzi Közlemények* 136 (3), 237-253.
- Deák, J. Á. 2011. A Dorozsma–Majsai-homokhát növényzete és annak főbb változásai tájléptékben In.: Rakonczai J. (szerk.) *Környezeti változások és az Alföld*. Nagyalföld Alapítvány kötetek 7. Békéscsaba. pp.327-339.
- Farkas, J.; Rakonczai, J.; Hoyk, E. 2015. Környezeti, gazdasági és társadalmi éghajlati sérülékenységi: esettanulmány a Dél-Alföldről. *Tér és Társadalom* 29 (1), pp. 149-174.
- Fiala, K.; Blanka, V.; Ladányi, Zs.; Szilassi, P.; Benyhe, B. et al. 2014. Drought severity and its effect on agricultural production in the Hungarian-Serbian cross-border area. *Journal of Environmental Geography* 7 (3–4), pp.43–51.
- Führer, E.; Marosi, Gy.; Jagodics, A.; Juhász, I. 2011. A klímaváltozás egy lehetséges hatása az erdőgazdálkodásban. *Erdészettudományi Közlemények* 1 (1), pp.17-28.
- Gao, B.-C. 1996. NDWI - A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment* 58, pp.257-276.
- Gálos, B.; Hänsler, A.; Kindermann, G.; Rechid, D.; Sieck, K.; Daniela, J. 2013. Esettanulmány a felszínborítás változás éghajlatmódosító hatásának vizsgálatára Európában. *Légtér* 58 (2), pp.57-63.
- Giri, C.; Pengra, B.; Long, J.; Loveland, T.R. 2013. Next generation of global land cover characterization, mapping, and monitoring. *Intern. Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 25. pp.30-37.
- GISTEMP Team 2017. *GISS Surface Temperature Analysis (GISTEMP)*. NASA Goddard Institute for Space Studies. <https://data.giss.nasa.gov/gistemp/>
- Göbölös A. 2002. A „vízhiányos” erdőgazdálkodás kérdései a Duna-Tisza közti homokháton. *Hidrológiai Közlemény* 82(6), 324-326.
- Gu, Y.; Brown, J.F.; Verdin, J.P.; Wardlaw, B. 2007. A five-year analysis of MODIS NDVI and NDWI for grassland drought assessment over the central Great Plains of the United States. *Geophysical Research Letters* 34. L06407, p.6.
- Gulácsi A.; Kovács, F. 2015. Aszályvizsgálat lehetősége MODIS műholdképekből számított spektrális indexekkel Magyarországon. *Tájökológiai Lapok* 13 (2), pp.235-248.
- Hmimina, G.; Dufrêne, E.; Pontailier, J.-Y.; Delpierre, N.; Aubinet, M.; et al. 2013. Evaluation of the potential of MODIS satellite data to predict vegetation phenology in different biomes: An investigation using ground-based NDVI measurements. *Remote Sensing of Environment* 132. pp.145-158.

- Huang, C.; Townshend, J.R.G.; Liang, S.; Kalluri, S.N.V.; DeFries, R.S. 2002. Impact of sensor's point spread function on land cover characterization: assessment and deconvolution. *Remote Sensing of Environment* 80(2), pp.203-212.
- Huete, A.R. 1988. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment* 25, pp.295-309.
- Huete, A.; Didan, K.; Miura, T.; Rodriguez, E.P.; Gao, X.; Ferreira, L.G. 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment* 83, pp.195-213.
- Hunkár, M.; Vincze, E.; Németh, Á. 2013. Tavaszi felmelegedés néhány vadnövény fenológiai reagálásában. *Léggör* 58 (3), 98-105.
- Ji, L.; Peters, A.J. 2003. Assessing vegetation response to drought in the northern Great Plains using vegetation and drought indices. *Remote Sensing of Environment*, 87. pp.85-98.
- Kaufman, Y.J.; Tanré, D. 1992. Atmospherically Resistant Vegetation Index (ARVI) for EOS-MODIS. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 30 (2), 261-270.
- Kauth, R.J.; Thomas, G.S. 1976. The tasselled cap—a graphic description of the spectral-temporal development of agricultural crops as seen by Landsat. In.: *Proceedings Symposium on Machine Processing of Remote Sensed Data*, Purdue University, Indiana, pp.41-51.
- Kertész, Á. 2009. The global problem of land degradation and desertification. *Hungarian Geographical Bulletin* 58 (1), pp.19-31.
- Kogan, F.N. 1990. Remote sensing of weather impacts on vegetation in non-homogeneous areas. *International Journal of Remote Sensing* 11. pp.1405–1419.
- Kogan, F.N. 1995. Droughts of the late 1980s in the United States as derived from NOAA polar-orbiting satellite data. *Bulletin of the American Meteorological Society* 76 (5), pp. 655-668.
- Kovács, F. 2007. Assessment of regional variations in biomass production using satellite image analysis between 1992 and 2004. *Transactions in GIS* 11.(6) pp.911-926.
- Kovács, F. 2009. Változékonyság értékelése vizes élőhelyeken – műholdképek alapján. *Hidrológiai Közöny* 89(2), pp.57-61.
- Kovács, F. 2011. Az alföldi terület-használat és változásainak értékelése. In: Rakonczai J. (szerk.) *Környezeti változások és az Alföld*. Nagyalföld Alapítvány kötetei 7. Békéscsaba. pp.159-166.
- Kovács, F. 2012. A klímaváltozás földrajzi hatásainak értékelése távérzékelési módszerekkel. In.: *Kockázat – Konfliktus – Kihívás*. VI. Magyar Földrajzi Konferencia, SZTE Természeti Földrajzi és Geoinformatikai Tszk. pp.444-452.
- Kovács, F. 2013. GIS analysis of short and long term hydrogeographical changes on a nature conservation area affected by aridification. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences* 8 (3), pp.97-108.
- Kovács, F.; Gulácsi, A. 2016. Klímaváltozás szempontú, multispektrális monitoring mezőgazdasági- és erdőterületeken. In.: Pajtókné Tari I.; Tóth, A. (szerk.) *Magyar Földrajzi Napok 2016* Konferenciakötet, Eszterházy Károly Egyetem – Magyar Földrajzi Társaság – Agrár Geográfia Alapítvány, pp.41-48.
- Kovács, F.; van Leeuwen, B.; Ladányi, Zs.; Rakonczai, J.; Gulácsi, A. 2017. Regionális léptékű aszálymonitoringot támogató vegetáció- és talajnedvesség értékelés MODIS adatok alapján. *Földrajzi Közlemények* 141 (1), pp. 14-29.
- Kristóf, D.; Pataki, R.; Neidert, D.; Nagy, Z.; Pintér, K. 2007. Integrating temporal and spectral information from low-resolution MODIS and high-resolution optical satellite images: two Hungarian case studies. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, Vol. 6742.
- Kugler, Zs. 2012. Remote sensing for natural hazard mitigation and climate change impact assessment. *Időjárás* 116 (1), pp.21-38.
- Ladányi, Zs.; Blanka, V. 2014. Az aszály és a biomassza produkció kapcsolata In.: Blanka, V.; Ladányi, Zs. (szerk.) *Aszály és vízgazdálkodás a Dél-Alföldön és a Vajdaságban / Drought and water management in South Hungary and Vojvodina*. SZTE, Természeti Földrajzi Tanszék, Szeged, pp. 103-110.
- Lakatos, M.; Bihari, Z.; Szentimrey, T. 2014. A klímaváltozás magyarországi jelei. *Léggör* 59 (4), 158-163.
- Li, Z.; Li, X.; Wei, D.; Xu, X.; Wang, H. 2010. An assessment of correlation on MODIS-NDVI and EVI with natural vegetation coverage in Northern Hebei Province, China. *Proc Environmental Sciences* 2, pp. 964-969.
- Liu H.Q.; Huete A.R. 1995. A feedback based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmospheric noise. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 33, pp.457–465.
- Lunetta, R.S.; Knight, J.F.; Ediriwickrema, J.; Lyon, J.G.; Worthy, L.D. 2006. Land-cover change detection using multi-temporal MODIS NDVI data. *Remote Sensing of Environment* 105, pp.142-154.
- Mátyás, Cs.; Führer, E.; Berki, I.; Csóka, Gy.; Drüsler, Á.; et al. 2010. Erdők a szárazsági határon. *Klíma-21 Füzetek*, 61. pp.84-97.
- Mezősi, G.; Blanka, V.; Ladányi, Zs.; Bata, T.; Urdea, P. et al. 2016. Expected mid- and long-term changes in drought hazard for the South-Eastern Carpathian Basin. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences* 11 (2), pp. 355–366.

- Mezősi, G.; Ladányi, Zs.; Blanka, V.; Meyer, B. 2014. Táji érzékenység. In.: Blanka, V.; Ladányi, Zs. (szerk.) *Aszály és vízgazdálkodás a Dél-Alföldön és a Vajdaságban / Drought and water management in South Hungary and Vojvodina*. SZTE Természeti Földrajzi és Geoinformatikai Tszk., pp.57-66.
- Móricz, N.; Berki, I.; Rasztovcics, N. 2011. A Nagyalföld erdeinek állapota és hatásuk a talajvízszintre. In. Rakonczai, J. (szerk.) *Környezeti változások és az Alföld*. Nagyalföld Alapítvány, Békéscsaba. pp.119-126.
- Nemzeti Vidékstratégia 2012-2020. Vidékfejlesztési Minisztérium, p.126.
- Newbold, T.; Hudson, L.N.; Arnell, A.P.; Contu, S.; De Palma, A. et al. 2016. Has land use pushed terrestrial biodiversity beyond the planetary boundary? A global assessment. *Science* 353 (6), pp. 288-291
- Norman, S.P.; Hargrove, W.W.; Spruce, J.P.; Christie, W.M.; Schroeder, S.W. 2013. *Highlights of satellite-based forest change recognition and tracking using the ForWarn System*. General Technical Report. U.S. Department of Agriculture Forest Service, Southern Research Station. p.30.
- Pálfi I. 2010. A Duna-Tisza közti hátság vízháztartási sajátosságai *Hidrológiai Közöny* 90 (1), pp.40-44.
- Rakonczai, J. 2011. Effects and Consequences of Global Climate Change in the Carpathian Basin. In.: Blaco, J.; Kheredmand, H. (eds.) *Climate Change - Geophysical Foundations and Ecological Effects*. Intech Open Access Publisher. pp.297-322.
- Rakonczai, J.; Deák J.Á.; Ladányi, Zs.; Fehér, Zs. 2012. A klímaváltozás és tájváltozás kapcsolata alföldi mintaterületen. In.: Rakonczai, J.; Ladányi, Zs.; Pál-Molnár, E (szerk.) *Sokarcú klímaváltozás*, GeoLitera, Szeged, pp.37-62.
- Rakonczai, J.; Fehér, Zs. 2015. A klímaváltozás szerepe az Alföld talajvízkészleteinek időbeli változásaiban. *Hidrológiai Közöny*. 95 (1), pp.1-15.
- Rouse, J.W.; Haas, R.H.; Scheel, J.A.; Deering, D.W. 1974. Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. In.: *Proceedings, 3rd ERTS Symposium* 1, p. 48-62.
- Solano, R.; Didan, K.; Jacobson, A.; Huete, A. 2010. *MODIS vegetation index user's guide* (MOD13 series) p.38.
- Szabó, B.; Vincze, E.; Czucz, B. 2016. Flowering phenological changes in relation to climate change in Hungary. *International Journal of Biometeorology* 60, pp.1347-1356.
- Szalai, J. 2012. Időjárási szélsőségek hatása a Duna-Tisza köze talajvízjárásának alakulására, In.: Nyári, D. (szerk.) *VI. Magyar Földrajzi Konferencia Konferencia Tanulmánykötete*, SZTE TFGT. pp.804-812.
- Szalai, S.; Auer, I.; Hiebl, J.; Milkovich, J.; Radim, T.; Stepanek, P. et. al. 2012. Climate of the Greater Carpathian Region. Final Technical Report. www.carpatlim-eu.org.
- Szilágyi, J.; Kovács, Á.; Józsa, J. 2012. Remote-sensing based groundwater recharge estimates in the Danube-Tisza sand plateau region of Hungary. *Journal of Hydromechanics* 60 (1), pp.64-72.
- Szilágyi, J.; Vörösmarty, Ch. 1993. A Duna-Tisza közti talajvízszint-süllyedések okainak vizsgálata, *Vízügyi Közlemények*, 75(3)
- Tan, B.; Woodcock, C.E.; Hu, J.; Zhang, P.; Ozdogan, M. et al. 2006. The impact of gridding artifacts on the local spatial properties of MODIS data: Implications for validation, compositing, and band-to-band registration across resolutions. *Remote Sensing of Environment* 105 (2), pp.98-114.
- van Leeuwen, B.; Tobak, Z.; Ladányi, Zs.; Blanka, V. 2014. Műholdas talajnedvesség becslési lehetőségek az aszály megfigyelésében és előrejelzésében. In.: Blanka, V.; Ladányi, Zs. (szerk.) *Aszály és vízgazdálkodás a Dél-Alföldön és a Vajdaságban / Drought and water management in South Hungary and Vojvodina*. SZTE, Természeti Földrajzi Tanszék, Szeged, pp. 258-266.
- van Leeuwen, W.J.D.; Orr, B.J.; Marsh, S.E.; Herrmann, S.M. 2006. Multi-sensor NDVI data continuity: Uncertainties and implications for vegetation monitoring applications. *Remote Sensing of Environment* 100, pp.67-81.
- Varga, Z.; Varga-Haszonits, Z.; Enzsölné Gerencsér, E.; Lantos, Zs.; Milics, G. 2012. A fehér akác (*Robinia pseudoacacia* L.) fejlődésének bioklimatológiai elemzése. *Acta Agronomica Óváriensis* 54 (1), pp.35-52.
- Verbesselt, J.; Hyndman, R.; Newnham, G.; Culvenor, D. 2010. Detecting trend and seasonal changes in satellite image time series. *Remote Sensing of Environment* 114 (1), pp.106-115.
- Völgyesi, I. 2006. A homokhátság felszínalatti vízháztartása. Vízpótlási és visszatartási lehetőségek. MHT XXIV. Országos Vándorgyűlés Kiadványa. Pécs. pp.1-12.
- Walkovszky A. 1998. Changes in phenology of the locust tree (*Robinia pseudoacacia*) in Hungary. *International Journal of Biometeorology* 41, 155-160.
- Xie, Y.; Sha, Z.; Yu, M. 2008. Remote sensing imagery in vegetation mapping: a review. *Journal of Plant Ecology* 1(1), pp.9-23.
- Xin, Q.; Olofsson, P.; Zhu, Z.; Tan, B.; Woodcock C.E. 2013. Toward near real-time monitoring of forest disturbance by fusion of MODIS and Landsat data. *Remote Sensing of Environment* 135, pp.234-247.
- Zargar, A.; Sadiq, R.; Naser, B.; Khan, F.I. 2011. A review of drought indices. *Environmental Reviews* 19. pp.333-349.
- Zsákovics, G.; Kovács, F.; Kiss, A. 2009. A szárazodás veszélyének többszempontú térbeli elemzése a Duna-Tisza közén. *Tájökológiai Lapok* 7 (1), pp.117-126.

Jogi hivatkozások

1040/1954. számú határozat: az erdőgazdasági termelés fejlesztéséhez szükséges intézkedésekről

Internet hivatkozások (utolsó letöltés: 2017. 10. 18.)

Airbus: <http://www.intelligence-airbusds.com/>

CARPATCLIM: <http://www.carpatclim-eu.org/pages/home/>

Copernicus: <http://www.copernicus.eu/>

Corine Land Cover (CLC): https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data#cl1=&c5=all&c0=5&b_start=0

Digitalglobe: <https://www.digitalglobe.com/>

European Drought Observatory (EDO): <http://edo.jrc.ec.europa.eu/edov2/php/index.php?id=1000>

IDB (Index database): <http://www.indexdatabase.de>

Integrált Vízháztartási Tájékoztatók, <https://www.vizugy.hu/index.php?module=archivum&programelemid=108>

KSH 2017. Földterület művelési ágak szerint http://www.ksh.hu/docs/hun/xstadat/xstadat_eves/i_omf003.html#

NéBIH Erdészeti Igazgatóság, Településsoros erdőterület adatok 2003–2015. NéBIH Erdészeti Igazgatóság

NOAA 2017. STAR: <https://www.star.nesdis.noaa.gov/smcd/emb/vci/VH/index.php>

OGIMET: <https://www.ogimet.com/home.phtml.en>

Szépszó, G.; Lakatos, M. 2017. (06.15.) Politikai döntések hatása az éghajlat megváltozására – nagyban és kicsiben. OMSZ, www.met.hu/ismeret-tar/erdekessegek_tanulmanyok/